



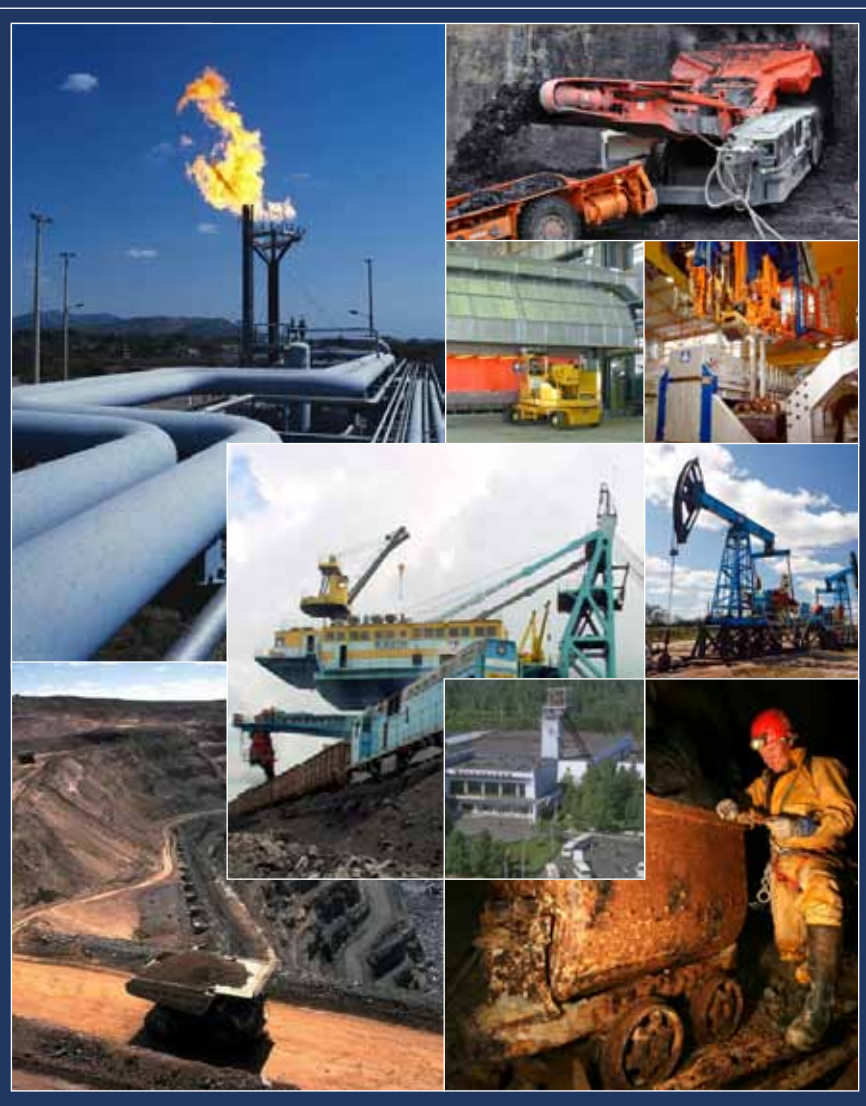
ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

том 213



ИЗДАЮТСЯ С 1907 Г.

НАУКА В НАЦИОНАЛЬНОМ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ «ГОРНЫЙ»



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2015

НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»



Россия, 199106 Санкт-Петербург,
21-я линия В.О.,2
Тел. (812) 327 7360,
факс (812) 327 7359
E-mail: rectorat@spmi.ru
<http://www.spmi.ru>

Из первого устава
Горного училища:

«... Берг-Коллегия надеется, что
выбранные ею учителя не оставят
исполнить с ревностью свою дол-
жность, а учащиеся с их стороны
показать в науках успехи, и упот-
реба их к общей пользе, доказать
усердие к услуге отечества и к
пользе своего роду; долг, котора-
го требует от них благодарность,
честность, закон и собственная их
самих польза».

Национальный минерально-сырьевой уни-
верситет «Горный» сегодня — это сеть спе-
циализированных аудиторий, оснащенных
современными отечественными и зарубежными прибо-
рами и оргтехникой. Благоприятная среда университета
способствует высокому уровню интеллекта и культуры
студентов — будущих инженеров, ученых и педагогов.
Это более 16000 студентов, более 211000 м² учебно-науч-
ных площадей. Университет имеет высший государствен-
ный статус образовательной системы России, являясь
особо ценным объектом культурного наследия народов
Российской Федерации.

Университет ведет подготовку по 46 направлениям ба-
калавриата и магистратуры, по 71 инженерной специ-
альности для России и 51 стран Азии, Европы, Африки и
Америки. Университет — это лучшее академическое об-
разование в области геологии, горного дела, шахтного
строительства, металлургии, геодезии, экономики, эко-
логии по всему спектру полезных ископаемых, включая
нефть и газ. Университет имеет высшую квалификацию
профессорско-преподавательского состава — более 88 %
— доктора и кандидаты наук, более 33 профессоров явля-
ются заслуженными деятелями науки.

Университет обладает уникальной научно-исследователь-
ской базой и выполняет исследования по следующим
приоритетным направлениям:

- Технологическое развитие минерально-сырьевой базы
- Разработка эффективных и ресурсосберегающих тех-
нологий добычи и переработки минерального сырья
- Разработка технологий обеспечения экологической
безопасности на объектах минерально-сырьевого ком-
плекса
- Обеспечение экономического и правового механизмов
управления недропользованием.





Издаются с 1907 года

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Том 213

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • 2015

научный журнал

Учредитель Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

Редакционный совет

ЛИТВИНЕНКО В.С., д-р техн. наук, профессор (председатель)
БАРЯХ А.А., д-р техн. наук, профессор
ВАЙСБЕРГ Л.А., чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор
КЛЕЙНЕР Г.Б., чл.-кор. РАН, д-р экон. наук, профессор
МАРИН Ю.Б., чл.-кор. РАН, д-р геол.-минерал. наук, профессор
НАБОЙЧЕНКО С.С., чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор
ПАШКЕВИЧ М.А., д-р техн. наук, профессор
СОМОВ В.Е., д-р экон. наук, канд. техн. наук, профессор

Иностранные члены редакционного совета

АНЦУТКИН ОЛЕГ, профессор, Швеция
ГУРГЕНЧИ ХАЛ, профессор, Австралия
КАЛМ ВОЛЛИ, профессор, Эстония
КРАСЛАВСКИ АНДЖЕЙ, профессор, Финляндия
КРОКЕ ЭДВИН, профессор, Германия
МУТИКАЙНЕН ИИПО, профессор, Финляндия
ВЛАСАК ПАВЕЛ, профессор, Чехия
ВЕЙСС ГАБРИЭЛЬ, профессор, Словакия

Редакционная коллегия

ЛИТВИНЕНКО В.С., д-р техн. наук (главный редактор)
ТРУШКО В.Л., д-р техн. наук (зам. главного редактора)
АФАНАСЬЕВ В.Г., д-р ист. наук
БРИЧКИН В.Н., д-р техн. наук
ГЕНДЛЕР С.Г., д-р техн. наук
ИВАНОВ М.А., д-р геол.-минерал. наук
ЛИГОЦКИЙ Д.Н., канд. техн. наук
ПОНОМАРЕНКО Т.В., д-р экон. наук
ПРОТОСЕНЯ А.Г., д-р техн. наук
РОГАЧЕВ М.К., д-р техн. наук
СЫРКОВ А.Г., д-р техн. наук
СЫЧЕВ Ю.А., канд. техн. наук
ЧЕРЕПОВИЦЫН А.Е., д-р экон. наук
ШПЕНСТ В.А., д-р техн. наук

Разделы

- Геология
- Горное дело
- Нефтегазовое дело
- Металлургия и обогащение
- Электромеханика и машиностроение
- Геонаноматериалы
- Геоэкология и безопасность жизнедеятельности
- Геоэкономика и менеджмент
- Горное образование: традиции и перспективы в XXI веке
- Слово молодому ученому

Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Научной электронной библиотеки [http:// elibrary.ru](http://elibrary.ru)

Редакция

Лебедев В.Л. (начальник РИЦ)
Дрибинская Е.С.
Левина Л.А.
Неверова И.В.
Ребещенкова И.Г.
Сочивко Н.И.

Адрес редакции: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

Тел. (812) 328-8416; факс (812) 327-7359

E-mail: rectorat@spmi.ru

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-22881 от 26.12.2005

© Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015



Published since 1907

PROCEEDINGS OF THE MINING INSTITUTE

Volume 213

ST PETERSBURG • 2015

Scientific Journal

Founded by the National Mineral Resources University (Mining University)

Editorial board

LITVINENKO V.S., Dr. of Engineering Sciences, Professor (chairman)
BARYAKH A.A., Dr. of Engineering Sciences, Professor
VAISBERG L.A., Associate Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. of Engineering Sciences, Professor
KLEINER G.B., Associate Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. of Economics, Professor
MARIN Y.B., Associate Member of the Russian Academy of Sciences,
Director of Geological and Mineral Sciences, Professor
NABOICHENKO S.S., Associate Member of the Russian Academy of Sciences
Dr. of Engineering Sciences, Professor
PASHKEVICH M.A., Dr. of Engineering Sciences, Professor
SOMOV V.E., Dr. of Economics, PhD of Engineering Sciences, Professor

Foreign members of the editorial board

ANTSUTKIN OLEG, Professor, Sweden
GURGENCI HAL, Professor, Australia
KALM VOLLI, Professor, Estonia
KRASLAWSKI ANDRZEJ, Professor, Finland
KROKE EDWIN, Professor, Germany
MUTIKAINEN ILPO, Professor, Finland
VLASAK PAVEL, Professor, Czech Republic
WEISS GABRIEL, Professor, Slovakia

Editorial panel

LITVINENKO V.S., Dr. of Engineering Sciences (Editor)
TRUSHKO V.L., Dr. of Engineering Sciences (Deputy Editor)
AFANASYEV V.G., Dr. of Historical Sciences
BRICHKIN V.N., Dr. of Engineering Sciences
GENDLER S.G., Dr. of Engineering Sciences
IVANOV M.A., Dr. of Geological and Mineral Sciences
LIGOTSKY D.N., PhD in Engineering Sciences
PONOMARENKO T.V., Dr. of Economics
PROTOSENYA A.G., Dr. of Engineering Sciences
ROGACHEV M.K., Dr. of Engineering Sciences
SIRKOV A.G., Dr. of Engineering Sciences
SYCHEV Y.A., PhD in Engineering Sciences
CHEREPOVITSIN A.E., Dr. of Economics
SHPENST V.A., Dr. of Engineering Sciences

Sections

- Geology • Mining • Oil and gas • Metallurgy and mineral processing • Electromechanics and mechanical engineering
- Geo-nanomaterials • Engineering geology and health and safety • Geoeconomics and management
- Mining education: traditions and perspectives in the XXI century • Young Scientists Speak

The journal is included in the Russian Science Citation Index

The Scientific Electronic Library <http://elibrary.ru>

Editorial

Lebedev V.L. (head of the Editing and Publishing Center)
Dribinskaya E.S.
Levina L.A.
Neverova I.V.
Rebeshchenkova I.G.
Sochivko N.I.

Editorial: 2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia

Tel. (812) 328-84-16; fax (812) 321-40-77

Email: lebedev@spmi.ru

Certificate of registration PI № ФС77-22881 from 26.12.2005

© National Mineral Resources University (Mining University), 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Геология

- Судариков С.М., Леонтьева Е.Н.* Прогнозирование изменения химического состава пластовых вод в процессе нефтедобычи по результатам термодинамического моделирования..... 5

Горное дело

- Александров В.И., Собота Иржи.* Удельная энергоемкость гидравлического транспортирования продуктов переработки минерального сырья 9
- Розенбаум М.А., Бадтиев Б.П.* Определение параметров анкерной крепи в условиях проявления зональной дезинтеграции пород вокруг выработок 17

Металлургия и обогащение

- Воропанова Л.А., Кокоева Н.Б.* Экстракция ионов железа (III) из водных растворов трибутилфосфатом 24

Электромеханика и машиностроение

- Анхель Оскар Колумбия Наварро, Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н.* Эквивалентирование электрической сети при наличии высших гармоник 31
- Безюков О.К., Афанасьева О.В.* Методы оценки виброактивности энергоустановок с использованием теории подобия и анализа размерностей 36
- Лебедев В.А., Леушева Е.Л., Моренов В.А.* Комплексное энергоснабжение при бурении скважин в осложненных климатических условиях 47
- Лукиенко Л.В., Гальченко К.В., Литвинов И.В.* Обоснование кинематических и силовых параметров зубчато-реечных движителей тяжело нагруженных горно-технологических машин 54
- Ляшенко А.Л., Першин И.М.* Разработка системы управления шаговыми двигателями в парогенераторных установках 62
- Первухин Д.А., Колесниченко С.В.* Навигационно-временное обеспечение систем управления высокодинамичных подвижных объектов 71

Геоэкология и безопасность жизнедеятельности

- Пашкевич М.А.* Экологически безопасные способы консервации техногенных месторождений 86

Геоэкономика и менеджмент

- Лебедев В.А., Спесивцев Б.И.* Возможность прогнозирования кризисных явлений на мировом рынке цен на нефть и газ на основе корреляционного анализа 94
- Хайкин М.М.* Сфера недропользования в контексте современного развития экономической теории 100

Горное образование: традиции и перспективы в XXI веке

- Грахов В.П., Кислякова Ю.Г., Симакова У.Ф.* Формирование и развитие творческого потенциала личности студентов технических вузов 110
- Шайдуров В.Н.* Федоров Евграф Степанович – ученый, педагог, администратор 116

CONTENTS

Geology

- Sudarikov S.M., Leont'eva E.N.* Forecasting changes in the chemical composition of reservoir waters in the course of oil production according to the results of thermodynamic modelling 5

Mining

- Alexandrov V.I., Jerzy Sobota.* Power consumption of hydraulic transport of products of mineral processing 9
- Rozenbaum M.A., Badtiev B.P.* Determination of the bolting parameters under conditions of the zonal disintegration of rocks around underground workings 17

Metallurgy and mineral processing

- Voropanova L.A., Kokoeva N.B.* Extraction of iron (III) ions from aqueous solutions with tributyl phosphate 24

Electromechanics and mechanical engineering

- Angel Oscar Columbie Navarro, Shklyarskiy Ya.E., Skamyin A.N.* Electric network equivalent in the presence of high harmonics 31
- Bezyukov O.K., Afanas'eva O.V.* Methods of evaluation of vibrational activity of power plants using the similarity theory and dimensional analysis 36
- Lebedev V.A., Leusheva E.L., Morenov V.A.* Complex power supply for well drilling in adverse climatic conditions 47
- Lukienko L.V., Galchenko K.V., Litvinov I.V.* Justification of kinematic and power parameters of rack and pinion gear for heavy-loaded mining machines 54
- Lyashenko A.L., Pershin I.M.* Development of the stepper motor control system in steam generating units 62
- Pervuchin D.A., Kolesnichenko S.V.* Navigation and time support management systems highly dynamic moving objects 71

Engineering geology and health and safety

- Pashkevich M.A.* Environmentally safe methods of technogenic deposits conservation 86

Geoeconomics and management

- Lebedev V.A., Spesivtsev B.I.* The possibility to predict the oil and gas price crisis in the world market on the basis of the correlation analysis 94
- Khaikin M.M.* Subsoil use within the context of the modern economic theory development 100

Mining education: traditions and perspectives in the XXI century

- Grahov V.P., Kislyakova U.G., Simakova U.f.* Formation and development of students' creative potential at a technical university 110
- Shaidurov V.N.* Evgraf Stepanovich Fedorov – scientist, teacher, administrator 116

УДК 55.556

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЛАСТОВЫХ ВОД В ПРОЦЕССЕ НЕФТЕДОБЫЧИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.М.СУДАРИКОВ, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, sergei_sudarikov@mail.ru*

Е.Н.ЛЕОНТЬЕВА, *аспирантка, saveleva.spmi@gmail.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены гидрогеохимические процессы, протекающие в продуктивных пластах при разработке нефтяных месторождений. Проанализировано влияние заводнения на изменение химического состава пластовых вод и возможное солеобразование. Использован метод компьютерного термодинамического моделирования физико-химических процессов для прогнозирования солеотложения на нефтяных месторождениях.

Ключевые слова: солеотложение, пластовые воды, гидрогеохимические процессы, моделирование.

Отложение неорганических солей при эксплуатации скважин является одной из основных проблем в решении задачи повышения эффективности добычи нефти. В настоящее время многие нефтяные месторождения страны находятся в состоянии интенсивного заводнения, с которым связано образование солей в скважинах. Это характерно и для Удмуртии, где основные месторождения находятся на завершающей стадии разработки и заводнение залежей является технологической основой их эксплуатации. При этом важно знать, как меняет свой химический состав закачиваемая в залежь вода при взаимодействии с породой пласта-коллектора и пластовыми жидкостями.

Солеобразование при разработке залежей нефти – достаточно сложный процесс, обусловленный как природными, так и техногенными факторами. При заводнении химический состав добывающих скважин меняется в диапазоне минерализаций от закачиваемой до пластовой воды и не является результатом их простого смешения в свободном объеме [1]. Закачка пресных вод в нефтяной пласт приводит к образованию многокомпонентной системы «закачиваемая вода – пластовая вода – погребенная вода – нефть с растворенным газом – породы пласта». В результате процессов, протекающих внутри пласта, в попутной воде увеличиваются концентрации ионов, потенциально способных к образованию солей. В результате термобарических изменений и смешения химически несовместимых вод из пересыщенных солями растворов происходит выпадение неорганических осадков. При определенных условиях пересыщенные солями растворы могут долгое время оставаться стабильными, не проявляя склонности к осадкообразованию, однако под воздействием явления, нарушающего равновесие солевого раствора, образуются осадки солей. Этому могут способствовать, например, попадание механических примесей и продуктов коррозии, которые становятся центрами кристаллизации, различные химические обработки. На отложение солей могут оказывать влияние и технологические особенности разработки залежей, например активность системы заводнения с повышенным давлением нагнетания [2].

Основными компонентами большинства отложений являются карбонат кальция, сульфат кальция и (или) сульфат бария. Отложения чистых сульфата или карбоната кальция встречаются редко, обычно они представляют собой смесь одного или нескольких основных неорганических компонентов с продуктами коррозии, частицами песка, причем отложения пропитаны или покрыты асфальто-смоло-парафиновыми веществами.

Поскольку бороться с последствиями солеотложения довольно трудно, а некоторые осадки сложного состава удалить практически невозможно, целесообразно проводить прогнозирование выпадения солей при различных условиях эксплуатации в целях предупреждения этого явления. Чаще всего прогнозирование осуществляется аналитически для конкретных объектов и условий на основе гидрохимических расчетов. Одним из видов аналитического прогнозирования является термодинамическое моделирование физико-химических процессов в природных водных растворах, в основе которого лежат законы равновесной термодинамики. Моделирование позволяет рассчитывать формы нахождения элементов в водных растворах и состояния насыщения растворов и таким образом решать широкий круг технологических задач, связанных с прогнозированием солеотложения.

Специфика и приемы прогнозирования зависят от типа солевых отложений, места образования солей (пласт, скважина, оборудование), технологии разработки залежей и других факторов.

Для прогнозирования солеотложения вследствие изменения химического состава пластовых вод методом термодинамического моделирования физико-химических условий были проанализированы гидрогеохимические процессы на Мишкинском нефтяном месторождении (Республика Удмуртия). Полученные результаты сравнивались с результатами аналитических расчетов по наиболее распространенным методикам (А.Ю.Намиота, Дж.Е.Оддо и М.В.Томсона, А.И.Чистовского, Ф.С.Гарифуллина) и с промысловыми данными [1, 4].

Подземные воды в пределах Мишкинского месторождения, как и на всей территории Удмуртии, приурочены ко всему разрезу осадочного чехла [3]. Продуктивными являются пласты верейского горизонта, башкирского яруса, тульского и бобриковского горизонтов (яснополянского надгоризонта) и турнейского яруса. Пластовые воды являются высокоминерализованными рассолами хлор-кальциевого типа (по Сулину) с промышленным содержанием йода и брома, плотностью $1,17 \text{ г/см}^3$, с очень низким содержанием гидрокарбонатов и сульфатов. Замеры концентрации водородных ионов рН единичные, значения близки к нейтральным, сдвинуты в сторону кислой среды. Все объекты месторождения разрабатываются с применением искусственного поддержания пластового давления. Водозабор для поддержания пластового давления расположен на р. Сива, протекающей по территории месторождения. Вода в реке пресная (минерализация $0,33 \text{ г/дм}^3$), гидрокарбонатная кальциевая, мягкая, в небольших количествах присутствуют нефтепродукты, железо и нитраты.

Для прогнозирования изменения химического состава пластовых вод и определения возможного химического состава механических примесей и отлагающихся солей в нефтеносных пластах Мишкинского месторождения в программе PHREEQC (version 3) были созданы модели процессов, протекающих при закачивании пресных вод в продуктивные горизонты и смешении закачиваемых вод с пластовыми.

Программа PHREEQC может быть использована для моделирования лабораторных экспериментов или различных химических реакций и процессов в природных водах. Для моделирования возможных вариантов солеотложения необходимо учесть в определенной последовательности процессы, протекающие как в водотоке в поверхностных условиях, так и в смеси двух типов вод в пластовых условиях [5].

1. Закачиваемые пресные поверхностные воды попадают в пластовые условия. Происходит смена окислительной среды на восстановительную, слабощелочной обстановки на слабокислую, низкие давление и температура сменяются высокими. При закачке пресных вод в нагнетательные скважины попадают бактерии, способные развиваться на забое и в призабойной зоне пласта.

2. Взаимодействие закачиваемых вод с вмещающими породами (выщелачивание ангидрита и гипса, содержащихся в терригенном коллекторе, окисление пирита) в пласте, приводит к увеличению концентрации сульфат-ионов в воде. Наличие органического субстрата и сульфатов при незначительном содержании кислорода является природной экосистемой, благоприятной для роста и жизнедеятельности сульфатовосстанавливающих бактерий, продуцирующих сероводород. Приток ионов железа происходит из закачиваемой воды и за счет геохимических процессов взаимодействия пирита минералов с кислородом воздуха в закачиваемой воде.

3. Внутрипластовое смешение закачиваемых вод с повышенным содержанием сульфат-ионов с пластовыми водами хлор-кальциевого типа приводит к выпадению гипса. Взаимодействие сероводорода с ионами железа ведет к образованию осадков сульфида железа.

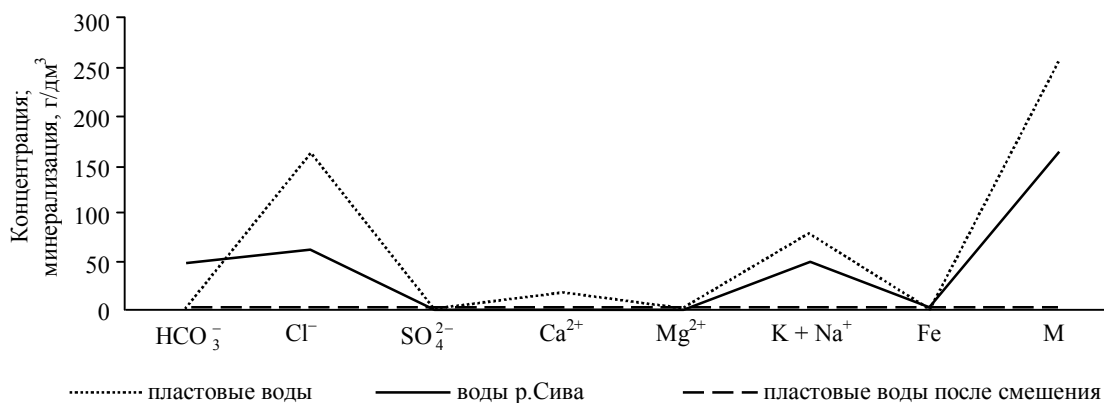
4. В пластовых условиях с высокой температурой и при отсутствии углекислого газа возможно выпадение в осадок кальцита, образующегося при смешении химически несовместимых вод.

Используя данные по химическому составу пластовых и закачиваемых вод, термобарическим, окислительно-восстановительным и кислотнo-щелочным условиям протекания процессов, минеральному составу кернов пород продуктивных горизонтов, с помощью моделирования в программе PHREEQC можно определить состав попутно-добываемых вод и оценить вероятность выпадения различных солей.

С помощью модели можно судить об изменении химического состава пластовых вод в ходе эксплуатации месторождения (см. рисунок). Пластовые воды в ходе заводнения в значительной степени опресняются, концентрации хлоридов и ионов натрия снижаются, а количество гидрокарбонат-ионов увеличивается. Концентрации сульфатов, ионов кальция, магния меняются незначительно. Кроме того, увеличивается концентрация железа, которое в полученном растворе присутствует в форме Fe^{2+} .

Анализ результатов моделирования для Мишкинского месторождения показывает, что химический состав механических примесей различается в зависимости от объекта разработки, но для всех объектов характерно высокое содержание сульфидов железа (от 47 до 73 % от объема всех примесей). Также в большом количестве присутствуют гипс (от 9 до 20 %) и соли, в основном хлориды (от 6 до 25 % $NaCl$, от 3 до 5 % $CaCl_2$, от 2 до 4 % $MgCl_2$). Для верейского объекта разработки характерно высокое содержание кальцита (15 %).

Результаты моделирования соответствуют промысловым данным, полученным в течение последних лет разработки, что говорит о достоверности проведенных расчетов. Это также подтверждается и результатами прогнозирования условий начала выпадения солей: по методикам А.Ю.Намиота, Дж.Е.Оддо и М.В.Томсона для карбонатов, по методике А.И.Чистовского для сульфатов и по методике Ф.С.Гарифуллина для сульфида железа.



Сравнение составов смешиваемых пластовых вод башкирского яруса, поверхностных вод и конечного раствора (согласно результатам моделирования)

На основе модели, созданной для анализа процессов смешения пластовых вод и закачиваемых пресных, можно прогнозировать изменение химического состава пластовых вод при дальнейшем заводнении. Для этого в модели необходимо увеличивать долю закачиваемых вод в смеси, а в качестве пластовых вод брать уже измененный раствор. Проведенное моделирование при таких условиях заводнения Мишкинского месторождения показало, что через 10 лет минерализация пластовых вод может снизиться на 68 г/дм^3 (26,6 %), плотность уменьшится на $0,08 \text{ г/см}^3$ (7 %) относительно первоначального состава на период начала заводнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кацавцев В.Е.* Солеобразование при добыче нефти / В.Е.Кацавцев, И.Т.Мищенко. М.: Орбита-М, 2004. 432 с.
2. *Маркин А.Н.* Нефтепромысловая химия: Практическое руководство / А.Н.Маркин, Р.Э.Низамов, С.В.Суховерхов. Владивосток: Дальнаука, 2011. 288 с.
3. *Савельев В.А.* Нефтегазосность и перспективы освоения ресурсов нефти Удмуртской Республики / Институт компьютерных исследований. М. – Ижевск, 2003. 288 с.
4. *Merkel B.J.* Groundwater geochemistry a practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems / B.J.Merkel, B.Planer-Friedrich. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 200 p.
5. *Parkhurst D.L.* Description of input and examples for PHREEQC version 3 – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43 / D.L.Parkhurst, C.A.J.Appelo. 2013. URL: <http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>.

REFERENCES

1. *Kaschavtsev V.E., Mischenko I.T.* Soleobrazovanie pri dobyche nefiti (*Salification in oil production*). Moscow: Orbita-M, 2004, p.432.
2. *Markin A.N., Nizamov R.E., Sukhoverkhov S.V.* Neftepromyslovaya khimiya: Prakticheskoe rukovodstvo (*Oilfield chemistry: a practical guide*). Vladivostok: Dalnauka, 2011, p.288.
3. *Savel'ev V.A.* Neftegazonosnost' i perspektivy osvoeniya resursov nefiti Udmurtskoi Respubliki (*Petroleum potential and prospects of development of the Udmurt Republic oil resources*). Institut komp'yuternykh issledovaniy. Moscow – Izhevsk, 2003, p.288.
4. *Merkel B.J., Planer-Friedrich B.* Groundwater geochemistry a practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems. (*Groundwater geochemistry a practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems*). Berlin: Springer-Verlag, 2005, p.200.
5. *Parkhurst D.L., Appelo C.A.J.* Description of input and examples for PHREEQC version 3 – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 2013. Available at: <http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>.

FORECASTING CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF RESERVOIR WATERS IN THE COURSE OF OIL PRODUCTION ACCORDING TO THE RESULTS OF THERMODYNAMIC MODELLING

S.M.SUDARIKOV, *Dr. of Geological & Mineral Sciences, Professor, sergei_sudarikov@mail.ru*
E.N. LEONT'EVA, *Postgraduate student, saveleva.spmi@gmail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article deals with hydrogeochemical processes in the productive strata in the course of oil field development. The impact of flooding on the change of the chemical composition of reservoir water and the possibility of salification are analyzed. Computer thermodynamic modelling of physico-chemical processes is used for prediction of salification in oil fields.

Key words: salification, reservoir waters, hydrogeochemical processes, modelling.

Горное дело Mining

УДК 622.794.502

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В.И.АЛЕКСАНДРОВ, *д-р техн. наук, профессор, alexvict@spmi.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

ИРЖИ СОБОТА, *профессор, jerzy.sobota@up.wroc.pl*

Университет природопользования, Вроцлав, Польша

Проблема снижения энергопотребления при гидравлическом транспорте продуктов переработки минерального сырья является одной из самых важных в горной промышленности. Увеличение концентрации твердой фазы в перекачиваемом потоке гидросмеси приводит с одной стороны к уменьшению объемной производительности гидротранспортной системы, а с другой к увеличению потерь давления и необходимого напора для преодоления гидравлических сопротивлений. Проблема минимизации удельного расхода энергии при гидравлическом транспорте продуктов обогащения особенно актуальна в настоящее время, когда в горной промышленности наметилась тенденция гидравлического транспортирования гидросмесей высоких концентраций и паст.

В статье показано, что удельная энергоемкость в определяющей степени зависит от производительности системы гидротранспорта по твердому материалу и эта зависимость имеет экстремальный характер. При малых концентрациях твердых частиц для обеспечения необходимой производительности необходимо перекачивать значительные объемы оборотной воды, что приводит к большим затратам электроэнергии. С увеличением концентрации происходит снижение объемного расхода пульпы и удельной энергоемкости процесса. Процесс снижения энергоемкости протекает до некоторого критического значения концентрации, при достижении которой с дальнейшим увеличением концентрации энергоемкость процесса увеличивается.

Ключевые слова: пульпа, твердые частицы, концентрация, удельная энергоемкость, грунтовый насос.

Анализ теоретических зависимостей потерь напора при гидравлическом транспорте сыпучих материалов, например, хвостов обогащения минерального сырья в горной промышленности, показывает, что с увеличением концентрации их величина возрастает. Увеличение концентрации всегда приводит к увеличению производительности по твердому материалу, что само по себе весьма положительно. Вместе с тем рост удельных потерь напора, а следовательно и потребной мощности, может снизить эффект от увеличения производительности в связи с ростом потребной энергии. При этом увеличение концентрации твердого материала приводит к уменьшению расхода гидросмеси. В связи с этим, величина мощности (энергии), определяемая произведением потребного давления и расхода, будет уменьшаться при росте концентрации до некоторого предельного значения, при достижении которого должен происходить рост мощности. Нахождение максимума концентрации твердого материала в потоке гидросмеси, которому будет соответствовать минимум потребной мощности, является важной научно-технической задачей, решение которой будет способствовать увеличению эффективности рабочего процесса и оборудования гидротранспортного комплекса.

Удельная энергоёмкость определяется [1, 5] мощностью, расходуемой при транспортировании 1 т твердого материала на расстояние 1 км, и может быть рассчитана по формуле

$$e = \frac{N}{q_{\text{ТВ}} L}, \quad (1)$$

где N – мощность, затрачиваемая на транспортирование гидросмеси, кВт; $q_{\text{ТВ}}$ – производительность системы по твердому материалу, т/ч; L – длина трубопровода (расстояние транспортирования), км.

Мощность, затрачиваемая на транспортирование гидросмеси, определяется параметрами перекачиваемого потока гидросмеси и численно равна произведению объемного секундного расхода $Q_{\text{СМ}}$ гидросмеси и давления, достаточного для преодоления гидравлических сопротивлений p , т.е.

$$N = \frac{Q_{\text{СМ}} p}{1000} = \frac{Q_{\text{СМ}} \rho_{\text{СМ}} g H}{1000}, \quad (2)$$

где $p = \rho_{\text{СМ}} g H$ – рабочее давление, Па; $\rho_{\text{СМ}}$ – плотность транспортируемой гидросмеси, кг/м³; H – потребный напор (удельная энергия) системы гидротранспорта, м, равный произведению удельных потерь $i_{\text{СМ}}$ напора на длину L трассы трубопровода.

Подставив соответствующее выражение для мощности, получим формулу (2) в следующем виде:

$$e = Q_{\text{СМ}} \frac{\rho_{\text{СМ}} g i_{\text{СМ}} L}{1000} \cdot \frac{1000}{3,6 q_{\text{ТВ}} L} = Q_{\text{СМ}} \frac{\rho_{\text{СМ}} g i_{\text{СМ}}}{3,6 Q_{\text{СМ}} \rho_{\text{ТВ}} c_{\text{ТВ}}} = \frac{\rho_{\text{СМ}} g i_{\text{СМ}}}{3,6 \rho_{\text{ТВ}} c_{\text{ТВ}}}. \quad (3)$$

Формула (3) показывает, что энергоёмкость гидротранспортной системы зависит от величины концентрации твердых частиц в объеме транспортируемой гидросмеси. Формулу (3) можно представить в виде выражения

$$e = AB, \quad (4)$$

где $A = g/3,6\rho_{\text{ТВ}}$ – постоянный множитель, зависящий от плотности транспортируемых твердых частиц; $B = \rho_{\text{СМ}} i_{\text{СМ}} / c_{\text{ТВ}}$ – параметр, величина которого определяется концентрацией твердых частиц в объеме перекачиваемой гидросмеси, назовем его приведенной плотностью.

Комплекс B (приведенная плотность), имеющий размерность плотности, можно рассматривать, как критерий энергоёмкости процесса гидравлического транспорта. Основной величиной, определяющей параметр B , является $i_{\text{СМ}}$ – потери напора, значение которых зависит от концентрации твердых частиц $c_{\text{ТВ}}$.

Приведенная плотность B зависит от соотношения величины расхода гидросмеси, определяемого концентрацией твердого материала, и значения необходимого (потребного) давления. Потребное давление является возрастающей функцией концентрации, а функция расхода – убывающей. Следовательно, кривые зависимости давления и расхода имеют единственное общее значение концентрации, которое в этом случае можно считать критическим значением $c_{\text{ТВ.кр}}$.

Для каждого вида гидросмеси, характеризующейся определенным гранулометрическим составом, необходимой производительностью по твердому материалу, имеется вполне определенная критическая концентрация. При концентрациях, меньших критической, потребная мощность гидротранспортной системы уменьшается с ростом концентрации. После достижения значения концентрации, равной критической, потребная мощность с дальнейшим ростом концентрации увеличивается.

На рис.1 приведены графические зависимости изменения расхода гидросмеси и потерь напора от величины концентрации, которые показывают, что обе кривые имеют общую характерную точку, соответствующую некоторому общему значению концентрации твердого материала.

Наличие критического значения концентрации твердого материала в объеме гидросмеси определяет минимальное значение приведенной плотности (параметра B). Кривые $Q(c_{тв})$ и $i_{см}(c_{тв})$ имеют общее решение, соответствующее критическому значению концентрации и минимальному значению приведенной плотности B как критерия энергоемкости, что подтверждается графиком зависимости энергоемкости от концентрации твердой фазы (рис.2).

Произведение расхода на потери давления определяет мощность процесса транспортирования, которая также будет иметь минимальное значение при достижении критической концентрации (рис.3).

Полученные теоретические зависимости по энергетическим затратам при течении гидросмесей по трубопроводам показывают, что всегда имеется некоторое предельное значение концентрации твердых частиц в объеме гидросмеси, при котором расходуемая мощность и удельная энергоемкость принимают наименьшие значения для заданных механических характеристик твердого материала. К таким характеристикам относятся гранулометрический состав твердых частиц, их крупность и плотность.

Покажем это на конкретном расчетном примере. Транспортируется 368 т/ч хвостов обогащения железной руды (Качканарский ГОК «Ванадий»). Плотность твердых хвостов 3450 кг/м³. Длина гидротранспортного трубопровода 2 км. Необходимо определить концентрацию гидросмеси, соответствующую наименьшей энергоемкости процесса гидравлического транспорта.

Выразим расчетные параметры как функции концентрации.

Объемный расход пульпы

$$Q = \frac{A_{тв}}{3600 \rho_{тв} c_{об}} = \frac{368}{3600 \cdot 3,450 c_{об}} = \frac{0,0296}{c_{об}}$$

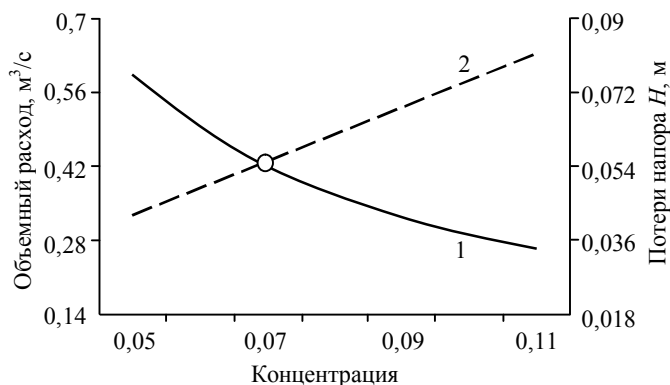


Рис. 1. Графические зависимости расхода (1) и потерь напора (2) от концентрации твердой фазы

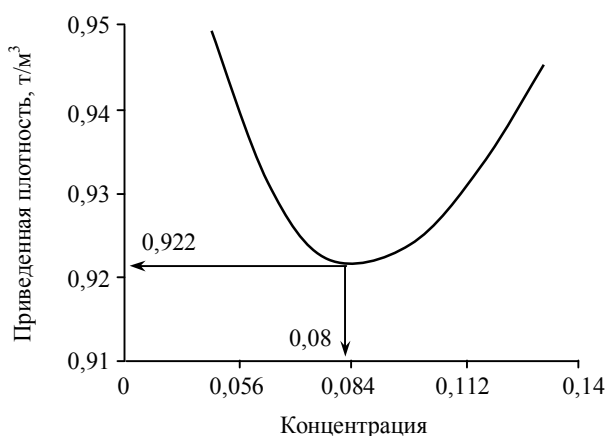


Рис.2. График изменения приведенной плотности от концентрации твердой фазы в объеме гидросмеси

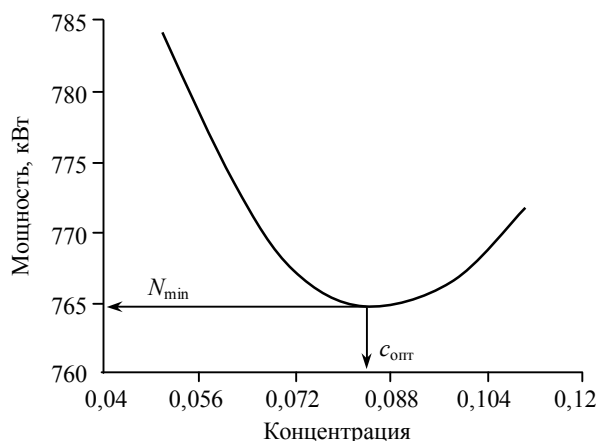


Рис.3. Зависимость мощности гидротранспорта от концентрации твердой фазы в потоке гидросмеси

Диаметр трубопровода

$$D = 0,51 \cdot \left(\frac{q_{\text{ТВ}}}{c_{\text{об}}^{1,17} \rho_{\text{ТВ}}} \right)^{0,37} = 0,51 \left(\frac{368}{3600 \cdot 3,45 c_{\text{об}}^{1,17}} \right)^{0,37} = \frac{0,139}{c_{\text{об}}^{0,433}}.$$

Средняя скорость потока гидросмеси для принятого диаметра трубопровода

$$v_{\text{cp}} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0,0296}{c_{\text{об}} \pi} \left(\frac{c_{\text{об}}^{0,433}}{0,139} \right)^2 = \frac{1,95}{c_{\text{об}}^{0,134}}.$$

Критическая скорость

$$v_{\text{кр}} = 7,8 c_{\text{об}}^{0,17} \sqrt[3]{D} = 7,8 c_{\text{об}}^{0,17} \sqrt[3]{\frac{0,139}{c_{\text{об}}^{0,433}}} = 4,04 c_{\text{об}}^{0,026}.$$

Соотношение критической и средней скорости потока гидросмеси в трубопроводе

$$\alpha = \frac{v_{\text{кр}}}{v_{\text{cp}}} = \frac{4,04 c_{\text{об}}^{0,026} c_{\text{об}}^{0,134}}{1,95} = 2,07 c_{\text{об}}^{0,16}.$$

Отметим в качестве пояснения, что если коэффициент $\alpha > 1$, то на его величину необходимо умножить расчетное значение дополнительных потерь напора $\Delta l_{\text{в}}$, расходуемых на транспортирование твердой фазы. В связи с этим, в расчетах желательно, чтобы средняя скорость потока пульпы несколько превышала критическую скорость. Если это условие не соблюдается, то трубопровод будет работать с неподвижным слоем осадка (слой заилиения).

Потери напора на транспортирование оборотной воды по формуле Дарси – Вейсбаха

$$i_{\text{в}} = \lambda \frac{v_{\text{cp}}^2}{2gD} = \lambda \frac{1,95^2 c_{\text{об}}^{0,433}}{2g c_{\text{об}}^{0,268} \cdot 0,139} = 1,394 \lambda c_{\text{об}}^{0,165}.$$

Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{cp}} D}{\nu},$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости оборотной воды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Если $\text{Re} < 700000$, то течение происходит в турбулентной зоне трения и коэффициент

$$\lambda = \frac{0,31}{\lg(\text{Re}-1)^2}; \text{ если } \text{Re} \geq 700000, \text{ то } \lambda = \left(1,74 + 2 \lg \frac{1}{2 \frac{k}{D}} \right)^{-2}, \text{ течение происходит в квадратичной}$$

зоне трения и коэффициент λ не зависит от числа Рейнольдса, а определяется только шероховатостью стенок трубы. Практика показывает, что для больших диаметров трубопроводов и действующих критических скоростей режим течения всегда квадратичный с постоянным значением коэффициента гидравлических сопротивлений $\lambda \approx 0,014$.

Дополнительные потери напора

$$\Delta i_{\text{в}} = 0,61 c_{\text{об}}.$$

Потери напора на транспортирование пульпы

$$i = i_{\text{в}} + \Delta i_{\text{в}} = 1,394 \lambda c_{\text{об}}^{0,165} + 0,61 c_{\text{об}} = 0,0195 c_{\text{об}}^{0,165} + 0,61 c_{\text{об}}.$$

Расчетная формула для дополнительных потерь напора принята по результатам экспериментальных исследований гидравлического транспорта хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОК «Ванадий» [6].

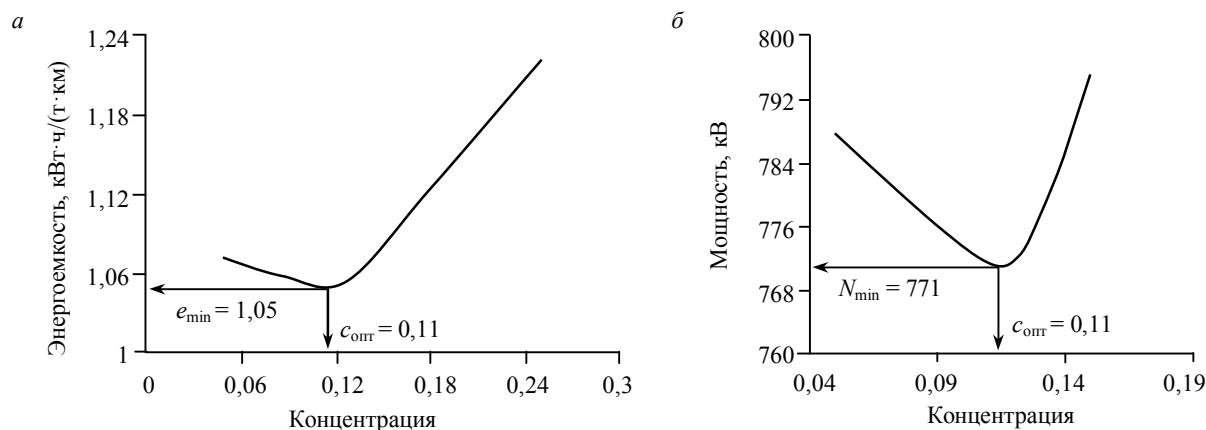


Рис.4. Графики зависимости удельной энергоёмкости (а) и мощности (б) при гидротранспорте хвостов обогащения железной руды

Получим результаты расчета параметров гидротранспорта хвостов обогащения железной руды Качканарского ГОКа «Ванадий»:

Концентрация	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
Расход, м ³ /с	0,592	0,269	0,228	0,197	0,148	0,118	0,099
Диаметр, м	0,508	0,361	0,336	0,316	0,28	0,253	0,234
Средняя скорость, м/с	2,91	2,62	2,56	2,51	2,42	2,35	2,29
Критическая скорость, м/с	2,4	2,46	2,46	2,47	2,49	2,51	2,52
Коэффициент α	0,825	0,94	0,96	0,982	1,03	1,06	1,1
Потери напора по воде $i_{в, м}$	0,012	0,013	0,014	0,017	0,01	0,015	0,016
Потери напора по твердому $\Delta i_{в, м}$	0,030	0,067	0,087	0,089	0,12	0,152	0,183
Потери напора в трубопроводе $i, м$	0,042	0,08	0,093	0,106	0,137	0,167	0,199
Необходимый напор, м	84,8	161	186	211	274	336	398
Плотность смеси $\rho_{см, кг/м^3}$	1122	1269	1318	1367	1490	1612	1735
Мощность, кВт	787	771	777	795	846	898	943
Энергоёмкость, кВт·ч/(т·км)	1,07	1,048	1,056	1,08	1,15	1,22	1,28

Из расчетных данных видно, что с увеличением концентрации твердого материала в объеме гидросмеси увеличиваются потери напора. Потребная мощность и удельная энергоёмкость в диапазоне концентраций от 0,11 до 0,13 принимают наименьшие значения. Графики зависимости удельной энергоёмкости и мощности, построенные по расчетным данным, приведены на рис.4.

Полученные теоретические зависимости о потреблении электроэнергии в потоке суспензии на трубопроводах показывают, что всегда есть некоторые ограничения значения концентрации твердых частиц в объеме, при которой энергоёмкость и удельный расход электроэнергии принимают наименьшее значение для набора механических характеристик твердого материала. К таким характеристикам относятся распределение твердых частиц по крупности и плотность твердых частиц.

Для определения зависимости удельного расхода электроэнергии от плотности твердого материала были выполнены расчеты, результаты которых приведены в таблице.

Расчетные данные показывают, что наибольшее значение потребляемой энергии соответствует меньшему значению концентрации твердых частиц. Увеличение концентрации приводит к снижению потребления энергии до некоторого минимального значения. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к увеличению энергопотребления. Можно отметить также, что с увеличением плотности твердых частиц энергоёмкость процесса уменьшается. Результаты расчета представлены на графиках зависимости расхода энергии от концентрации гидросмеси при изменении плотности твердых частиц от 4000 до 2400 кг/м³ (рис.5).

**Мощность и удельная энергоёмкость гидротранспортной системы
при изменении плотности и концентрации твердого материала**

Параметры	Производительность по твердому материалу $A_{ТВ} = 368$ т/ч						
	Плотность твердого $\rho_{ТВ} = 4000$ кг/м ³						
$c_{об}$	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
N , кВт	400,24	319,99	308,96	298,98	291,38	287,37	286,5
e , кВт·ч/(т·ч)	0,534	0,435	0,42	0,406	0,396	0,39	0,389
$c_{об}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
N , кВт	284,54	291,87	295,85	299,47	301,35	304,63	311,27
e , кВт·ч/(т·ч)	0,387	0,396	0,402	0,407	0,409	0,414	0,423
Плотность твердого $\rho_{ТВ} = 3450$ кг/м ³							
$c_{об}$	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
N , кВт	442,34	347,31	333,75	326,7	309,04	298,56	295,47
e , кВт·ч/(т·ч)	0,601	0,472	0,453	0,443	0,420	0,405	0,401
$c_{об}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
N , кВт	295,11	298,56	299,59	301,95	304,5	307,91	311,03
e , кВт·ч/(т·ч)	0,4	0,405	0,407	0,41	0,414	0,418	0,422
Плотность твердого $\rho_{ТВ} = 2900$ кг/м ³							
$c_{об}$	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
N , кВт	501,3	386	368	354	333	320,6	314
e , кВт·ч/(т·ч)	0,681	0,524	0,5	0,481	0,452	0,435	0,427
$c_{об}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
N , кВт	308	308,2	307,4	306	308	311,4	311
e , кВт·ч/(т·ч)	0,418	0,419	0,417,7	0,415	0,418	0,423	0,423
Плотность твердого $\rho_{ТВ} = 2900$ кг/м ³							
$c_{об}$	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
N , кВт	528,1	399,4	387	372,3	347,8	331,7	322,1
e , кВт·ч/(т·ч)	0,717	0,543	0,526	0,506	0,472	0,451	0,438
$c_{об}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
N , кВт	316	312,5	312,3	309,6	310	313,2	320
e , кВт·ч/(т·ч)	0,429	0,424	0,424	0,421	0,421	0,425	0,435
Плотность твердого $\rho_{ТВ} = 2400$ кг/м ³							
$c_{об}$	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
N , кВт	581,2	434,4	415,1	393,5	365	347,3	336,2
e , кВт·ч/(т·ч)	0,791	0,59	0,564	0,535	0,496	0,472	0,457
$c_{об}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
N , кВт	327,4	322,5	318,2	317,9	315,5	317,1	320
e , кВт·ч/(т·ч)	0,445	0,438	0,432	0,432	0,429	0,431	0,435

На графиках (рис.5) видно, что удельная энергоёмкость уменьшается с увеличением плотности твердых частиц.

При проектировании систем гидротранспорта должна быть решена задача о величине концентрации твердого материала в объеме транспортируемой гидросмеси, от которой зависит мощность грунтовых насосов. Как правило, на практике этот выбор зависит от опыта инженера-проектировщика. Расчеты, выполненные в настоящей работе, показывают, что потребление энергии является сложной функцией, определяемой механическими характеристиками твердой фазы суспензии потока.

Величина энергии при гидравлическом транспорте, также как удельная энергоёмкость на невысоких концентрациях гидросмеси, достигает наибольших значений и стремится к минимуму с увеличением объемного содержания твердого материала. После достижения минимума мощности и удельной энергоёмкости с дальнейшим увеличением концентрации значения этих параметров увеличиваются.

Минимальное значение мощности и удельного расхода электроэнергии определяют наиболее эффективный режимы работы системы гидротранспорта и применяемого грунтового насоса с наибольшим значением КПД.

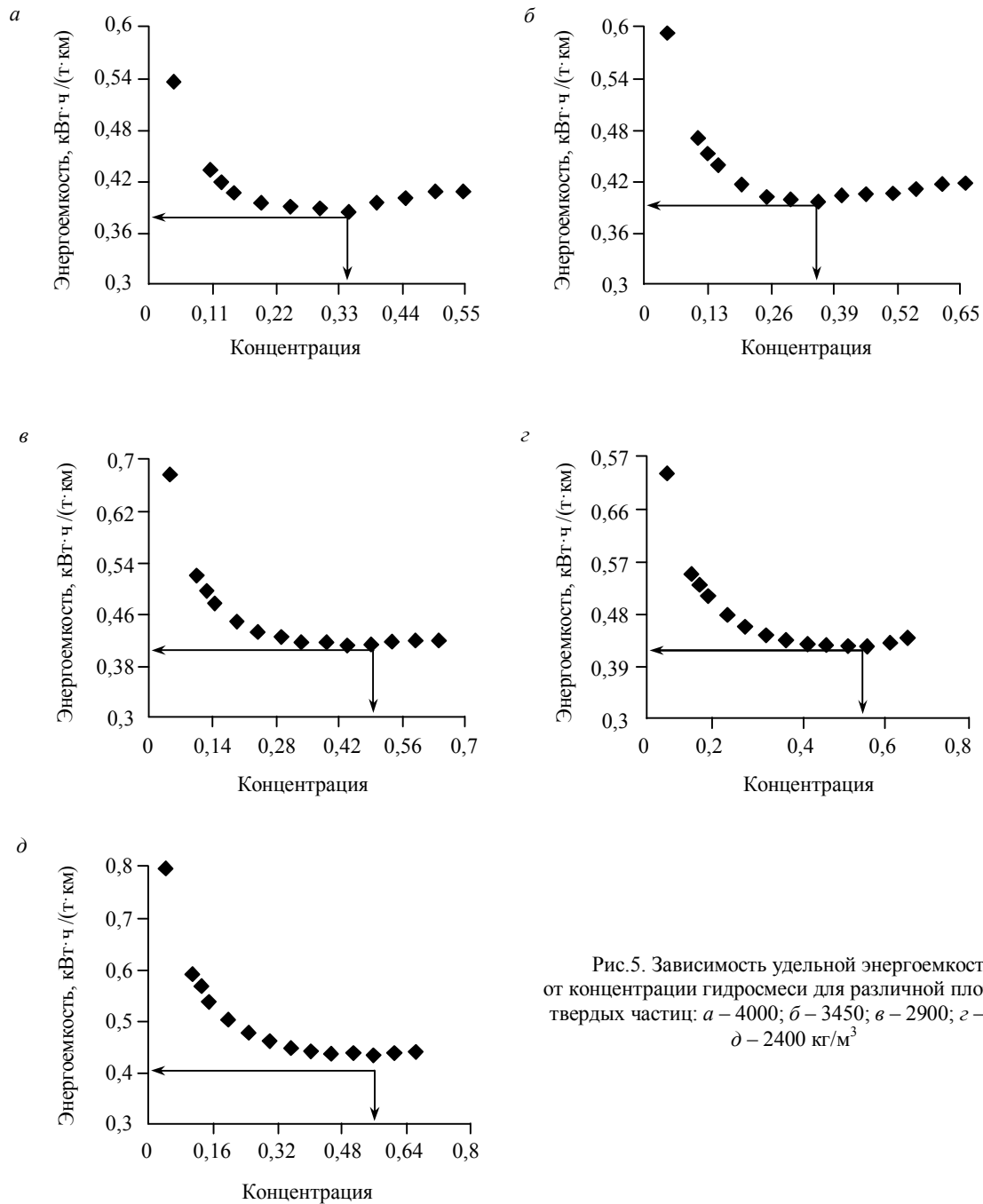


Рис.5. Зависимость удельной энергоёмкости от концентрации гидросмеси для различной плотности твердых частиц: а – 4000; б – 3450; в – 2900; г – 2700; д – 2400 кг/м³

По результатам выполненного теоретического исследования можно сделать следующие общие выводы:

1. Энергетические характеристики гидравлического транспорта для гидросмесей различных видов определяются концентрацией твердой фазы в потоке гидросмеси и плотностью твердых частиц.

2. Удельная энергоёмкость гидравлического транспорта является сложной функцией основных параметров гидросмеси и имеет экстремум, соответствующий минимальному потреблению энергии и оптимальной концентрации твердой фазы в потоке гидросмеси.

3. С увеличением плотности твердой фазы энергопотребление гидротранспортной системы уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.И. Энергоемкость гидравлического транспортирования крупнодисперсных и мелкодисперсных гидросмесей / В.И.Александров, П.Р.Махараткин, С.Ю.Авксентьев // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 6. С.39-44.
2. Babcock H.A. Heterogeneous flow of heterogeneous solids. Advances in solid liquid flow in pipes and its application. Pergamon Press New York, 1970, p.125-148.
3. Kamal El-Nahhas, Nageh Gad El-Hak, Magdy Abou Rayan and Imam El-Sawaf. Effect of particle size distribution on the hydraulic transport of settling slurries. Thirteenth International Water Technology Conference. Hurghada, Egypt, 2009, p.198-210.
4. Lahiri S.K., Ghanta K.C. Minimize power consumption in slurry transport. National Institute of Technology. Durgapur. West Bengal. India, 2008, p.152.
5. Gillies R.G., Hill K.B., McKibben M.J., Shook C.A. Solids transport by laminar Newtonian flows. Powder Technology. Vol.104. 1999, p.269-277.
6. Thomas D.G. Transport characteristics of suspensions: Part VI – Minimum transport velocity for large particle size suspensions in round horizontal pipes. AIChE J. Vol.8. 1998, p.373-378.

REFERENCE

1. Aleksandrov V.I., Makharatkin P.N., Avksentiev S.Y. Energoemkost' gidravlicheskogo transportirovaniya krupnodispersnykh i melkodispersnykh gidrosmesi (Specific power consumption of hydraulic transportation of mixtures with coarse and fine solid particles). Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2012. N 7, p.72-79.
2. Babcock H.A. Heterogeneous flow of heterogeneous solids. Advances in solid liquid flow in pipes and its application. Pergamon Press New York, 1970, p.125-148.
3. Kamal El-Nahhas, Nageh Gad El-Hak, Magdy Abou Rayan and Imam El-Sawaf. Effect of particle size distribution on the hydraulic transport of settling slurries. Thirteenth International Water Technology Conference. Hurghada, Egypt, 2009, p.198-210.
4. Lahiri S.K., Ghanta K.C. Minimize power consumption in slurry transport. National Institute of Technology. Durgapur. West Bengal. India, 2008, p.152.
5. Gillies R.G., Hill K.B., McKibben M.J., Shook C.A. Solids transport by laminar Newtonian flows. Powder Technology. Vol.104. 1999, p.269-277.
6. Thomas D.G. Transport characteristics of suspensions: Part VI – Minimum transport velocity for large particle size suspensions in round horizontal pipes. AIChE J. Vol.8. 1998, p.373-378.

POWER CONSUMPTION OF HYDRAULIC TRANSPORT OF PRODUCTS OF MINERAL PROCESSING

V.I.ALEKSANDROV, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, alexvict@spmi.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia
JERZY SOBOTA, *Professor, jerzy.sobota@up.wroc.pl*
University of Environmental and Life Sciences, Wroclaw, Poland

The problem of decreasing power consumption by hydraulic transport systems remains to be the most important among other problems in the mining industry. The increase of solid material concentration in the volume of transported pulp leads to reduction of general pulp flow rate on the one hand and to increase of pressure losses and, accordingly, of a necessary head for overcoming hydraulic resistance on the other hand. The problem of minimizing power consumption in slurry transport is of particular relevance now when there is a tendency for hydraulic transport of highly-concentrated pulps and pastes to be widely used in the mining industry.

The article shows that the energy intensity to a certain extent depends on the performance of hydraulic transport of solid materials, and this dependence is of extreme nature. At low concentrations of solid particles large volumes of recycled water have to be pumped to provide the necessary performance, which leads to consumption of large amounts of electricity. The increase of concentration results in the decrease in the volumetric flow rate of the pulp and, accordingly, specific power consumption of the process. The process of reducing energy consumption takes place up to a certain critical value of the concentration above which a further increase in the concentration raises power consumption.

Key words: slurry, solid particles, concentration, specific power consumption, slurry pump.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНКЕРНОЙ КРЕПИ В УСЛОВИЯХ ПРОЯВЛЕНИЯ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТОК

М.А.РОЗЕНБАУМ, *д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией, dav886@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия
Б.П.БАДТИЕВ, *д-р техн. наук, заместитель директора департамента горнорудного производства, B.badtiev@metalloinvest.com*
ООО Управляющая компания «Металлоинвест», Москва, Россия

Явление зональной дезинтеграции горных пород обнаружено сравнительно недавно при изучении поведения массива горных пород вокруг подземных выработок на большой глубине. Основным элементом наблюдаемой структуры является система концентрических трещин, параллельных контуру выработки.

Приведены методики и расчетные формулы определения параметров анкерной крепи горных выработок, пройденных в предельно-напряженном массиве пород на больших глубинах в условиях проявления зональной дезинтеграции пород вокруг выработок.

Ключевые слова: анкерная крепь, зональная дезинтеграция пород, большие глубины, несущий слой, блочный массив.

Явление зональной дезинтеграции горных пород обнаружено сравнительно недавно при изучении поведения массива горных пород вокруг подземных выработок на большой глубине [4, 5, 13]. Большая часть известных экспериментов [9, 11, 12] относится к горным выработкам рудников «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского горно-металлургического комбината, расположенным на глубине 800-1050 м. В работах отмечается особый характер разрушения пород вокруг этих выработок, заключающийся в том, что области раздробленных и ненарушенных пород формируются в чередующиеся зоны с границами, геометрически подобными контуру выработок. Зональная структура разрушения установлена многочисленными натурными измерениями, выполненными электрометрическим методом, подтверждена визуальными наблюдениями и лабораторными экспериментами, моделирующими условия больших глубин [6, 8, 10].

Основным элементом наблюдаемой структуры является система концентрических трещин, параллельных контуру выработки. К этим трещинам с внешней по отношению к выработке стороне примыкают области дезинтегрированной породы, сменяющиеся слоями слабо нарушенных пород.

Исследования [1] показали, что вследствие проявления зональной дезинтеграции пород вокруг выработок, блочный массив на расстоянии от контура выработки 712 м можно рассматривать как слоистый трещиноватый массив с толщиной слоев от 0,6-0,8 до 1,2-1,5 м и более.

Для поддержания выработок в эксплуатационном состоянии после образования вокруг них зон дезинтеграции необходимо обеспечить устойчивость их кровли и боков крепью с такими параметрами, чтобы особо нарушенные области пород между зонами дезинтеграции сохраняли устойчивость при реальных пролетах выработок и сложившейся горно-геомеханической обстановке. Таким образом, поддержание выработок в условиях зональной дезинтеграции пород значительно отличается от обычных. В случае зональной дезинтеграции мы по существу имеем дело не со сплошным, а со слоистым массивом; при этом расчет устойчивости выработок, в кровле которых образовались слои пород, также должен отличаться от расчета устойчивости кровли, сложенной крупноблочными породами.

Условно выделенная в слабонарушенных породах с учетом первой зоны дезинтеграции слоистая балка при пролете B обеспечит устойчивость кровли выработки при условии

$$B = \sqrt{\frac{8R_{\text{ин}}h_3^2}{3\gamma_{\text{пр}}h_n}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{ин}}$ – прочность на изгиб несущего слоя, МПа; h_3 – эквивалентная мощность кровли, представленной материалом несущего слоя, м; $\gamma_{\text{пр}}$ – средневзвешенный объемный вес всей пачки рассчитываемых слоев; h_n – фактическая мощность неоднородной пачки, состоящей из n слоев.

Как показали исследования [2], размеры слоев, образовавшиеся при зональной дезинтеграции, практически исключают применение анкерной крепи, работающей по принципу «подвески» сравнительно слабых слоев к более крепкому слою, и обеспечение устойчивости выработки может быть достигнуто путем формирования с помощью анкерной крепи несущего слоя определенной мощности.

По заданной ширине выработки арочного сечения B путем преобразования формулы (1) получена формула для определения мощности несущего слоя пород, который необходимо скрепить железобетонной или сталеполимерной анкерной крепью:

$$m_{\text{н.с}} = 0,8 \sqrt{\frac{4B^2\gamma_1 K_r K_y K_{\text{п}}}{R_c K_{\text{зап}}}}, \quad (2)$$

где B – фактическая ширина выработки, м; γ_1 – объемный вес пород; K_r – коэффициент глубины, $K_r = \lambda\gamma_1 H/R_c$; K_y – коэффициент упрочнения пород за счет анкерования; $K_{\text{п}}$ – коэффициент пригрузки; $K_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса; H – глубина расположения выработки, м; R_c – прочность пород в образце на сжатие, МПа.

Перед тем как производить расчеты по формуле (2) необходимо представить расчетную схему и выбрать значения коэффициентов, входящих в эту формулу.

Коэффициент глубины. В этой формуле λ – коэффициент концентрации напряжений. Как показали исследования, для возникновения зональной дезинтеграции коэффициент концентрации должен быть не менее 1,2-2,5. При возникновении этого явления в момент проведения выработки принимаем $\lambda = 1,2 \div 1,5$; при проявлении этого явления во времени в результате пригрузки в зоне опорного давления коэффициент λ следует принимать равным 2,0-2,5.

Коэффициент упрочнения пород за счет анкерования. Как показали исследования [1], K_y при установке анкерной крепи нормально к напластованию следует принимать равным 1,4, при установке анкеров, попарно пересекающихся под углом 45-60° к напластованию, $K_y = 1,7$.

Коэффициент пригрузки. Развивая идею гипотезы балок, Г.Н.Кузнецов исследовал экспериментально величину пригрузки нижнего слоя кровли [7]. Опыты осуществлялись на моделях из эквивалентных материалов и были направлены на определение давления, испытываемого нижним слоем со стороны вышележащих слоев. Величина такого давления оценивалась коэффициентом пригрузки по формуле

$$K_{\text{п}} = \frac{q_n}{\gamma h_o},$$

где q_n – интенсивность давления, передаваемого на нижний несущий слой; h_o – мощность несущего слоя; γ – объемный вес материала несущего слоя.

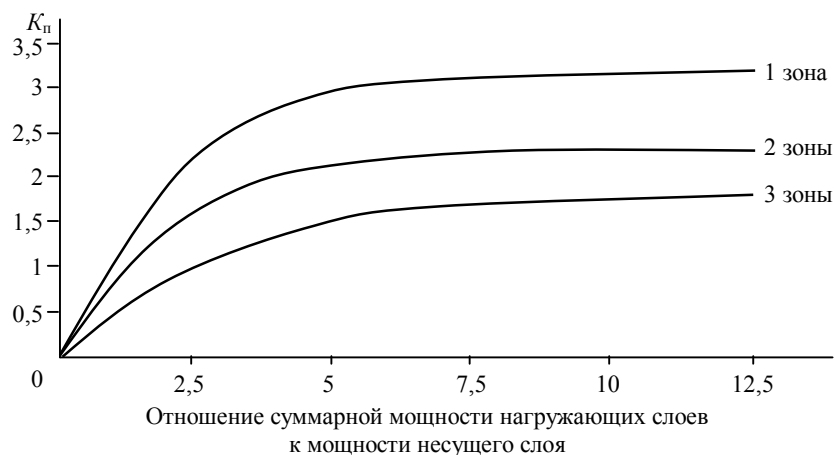


Рис. 1. Значения коэффициентов пригрузки на несущий слой кровли со стороны вышележащих слоев [7]

Как показали опыты [3, 7], с увеличением суммарной мощности нагружающих слоев $\sum h_i$ коэффициент пригрузки постепенно возрастает до определенного значения, а затем при $\sum \frac{h_i}{h_o}$ практически остается постоянным. Чем меньше значение h_o , тем больше значение K_p .

На рис. 1. представлены зависимости значения K_p от количества зон дезинтеграции, полученные на моделях [7].

Значения коэффициентов пригрузки на несущий слой кровли со стороны вышележащих слоев по [7]

Как видно, с изменением $\sum \frac{h_i}{h_o}$ коэффициент пригрузки увеличивается от 0,5 при формировании одной зоны до 3,1 при формировании двух до 2,3 и трех зон до 1,7.

Коэффициент запаса. Как известно, прочность руд и пород в массиве зависит от густоты трещин, направления действующего усилия по отношению к плоскости трещин, свойств минерала-заполнителя трещин и т.д.

Ослабление прочности пород в массиве по сравнению с прочностью породы в образце характеризуется коэффициентом структурного ослабления K_c , равным частному от деления показателя прочности в массиве на соответствующий показатель прочности в образце. Например, при одноосном сжатии

$$K_c = \frac{\sigma_{сж}^м}{\sigma_{сж}^o}$$

Ориентировочные значения коэффициента структурного ослабления K_c в зависимости от угла α_r между плоскостью трещин и направлением приложенной нагрузки и от густоты трещин, полученные в результате натуральных и лабораторных испытаний, приведены в таблице.

Число трещин на 1м	Значение коэффициента K_c		
	α_r , град		
	0-20; 50-90	20-30	30-50
4	0,50-0,60	0,35-0,50	0,30-0,35
4-10	0,35-0,40	0,30-0,35	0,25-0,30
10-20	0,30-0,35	0,25-0,30	0,20-0,25

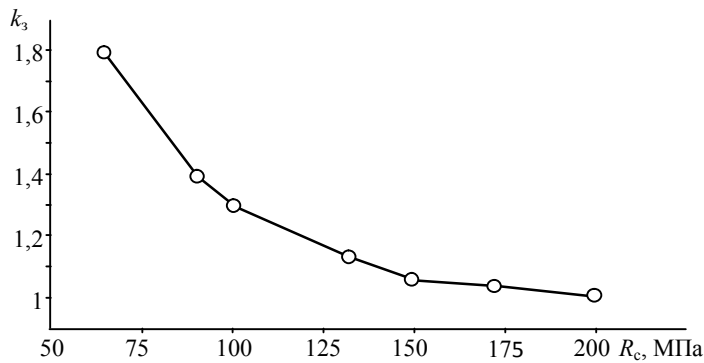


Рис.2. Значения коэффициента запаса для пород различной прочности

Коэффициент запаса необходимо выбрать с таким расчетом, чтобы был обеспечен известный запас против проявления опасного состояния материала. Обработка данных по испытанию горных пород Талнахского рудного узла в различных режимах нагружения позволила установить общие значения коэффициента запаса по отношению к пределу прочности породы на одноосное сжатие. На рис.2 приведены значения K_3 для пород Талнахского рудного узла при значении предела прочности на одноосное сжатие. Как видно с увеличением прочности пород с 60 до 200 МПа коэффициент запаса уменьшается с 1,8 до 1,0.

После выбора коэффициентов необходимо определить средневзвешенную прочность породы на сжатие по формуле

$$R_c = (R_{\max} + R_{\min})/2,$$

где R_{\max} и R_{\min} – максимальное и минимальное сопротивление пород на одноосное сжатие в кровле на высоту $B/2$.

Длину анкера принимаем равной сумме мощности несущего слоя и длины выступающей в выработку части, т.е. $l_a = m_{н.с} + l_b$.

После определения мощности несущего слоя и длины анкеров задают расстояния между рядами анкеров в диапазоне 0,5-1,0 м и по номограмме (рис.3) определяют сопротивление анкерной крепи $P_{а.к}$ в зависимости от соотношения $B/m_{н.с}$ и принимают расстояние между рядами анкеров C_k .

После расчета необходимого сопротивления анкерной крепи определяют фактический периметр свода, считая, что с некоторым приближением он равен длине полуокружности, диаметр которой равен расстоянию между пятами свода B_1 :

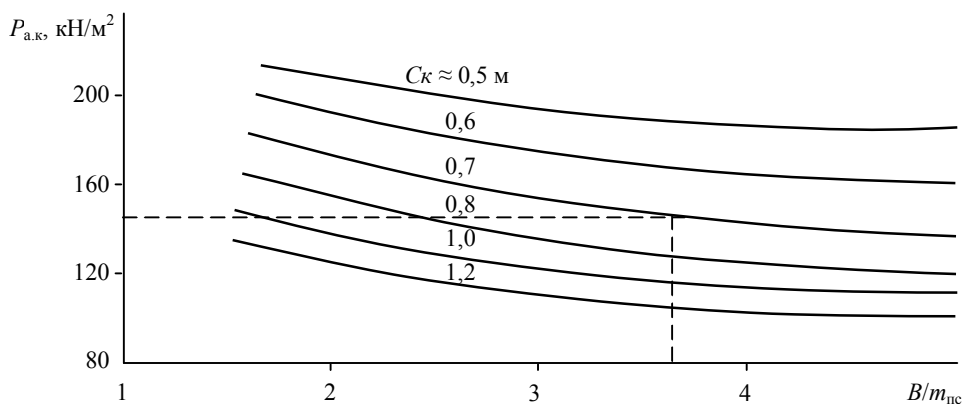


Рис.3. Номограмма по определению сопротивления анкерной крепи

Однако при использовании значений прочности для расчета устойчивости кровли полученных данных недостаточно. Все величины, характеризующие механические свойства пород как в образце, так и в массиве, получены при действии статической нагрузки, возрастающей постепенно без толчков, ударов, перемены знака и т.д. На практике в целом ряде случаев приходится иметь дело с действием именно таких нагрузок.

$$L_{с.в} = \pi B_1 / 2 ,$$

где $L_{с.в}$ – фактический периметр свода выработки.

Требуемое количество анкеров в ряду рассчитывается по формуле

$$\Pi_{к} = \frac{P_{а.к} L_{с.в} + C_{к}}{N_{а}} + \frac{2h_1}{C_{к}} ,$$

где h_1 – расстояние от почвы выработки до пяты свода; $N_{а}$ – несущая способность анкера, для железобетонных анкеров $N_{а} \leq 60$ кН, для сталеполимерных $N_{а} \geq 130$ кН.

Пример расчета параметров железобетонных анкеров для конкретных условий рудника «Октябрьский». Выработка – грузовой квершлаг. Исходные данные для расчета: форма сечения выработки арочная, ширина выработки между пятами свода 5,5 м; объемный вес пород $\gamma = 3,0$ т/м³; выработка находится вне зоны опорного давления в условиях проявления зональной дезинтеграции с образованием трех зон дезинтеграции, глубина работ 950 м. Анкеры устанавливают нормально к напластованию и к поверхности выработки. Средневзвешенная прочность пород 90 МПа.

Принимаем схему работы кровли аналогично арке с жесткой заделкой в пятах свода.

Определим значения коэффициентов, входящих в формулу (2).

1) коэффициент глубины $K_r = \lambda \gamma_1 H / R_c$, при $\lambda = 2,5$ $K_r = 2,5 \cdot 3 \cdot 950 / 9000 = 0,8$;

2) так как анкера располагают нормально к напластованию, $K_y = 1,4$;

3) при условии формирования трех зон дезинтеграции в соответствии с графиком (см. рис.1) выбираем $K_n = 3,0$.

4) по прочности породы из графика (см. рис.2) выбираем коэффициент запаса $K_z = 1,35$.

Рассчитаем мощность несущего слоя, который необходимо скрепить железобетонными анкерами, чтобы обеспечить устойчивость выработки:

$$m_{н.с} = 0,9 \sqrt{\frac{4 \cdot 5,5^2 \cdot 3,0 \cdot 0,8 \cdot 1,4 \cdot 1,7}{90 \cdot 1,35}} \approx 2,0 \text{ м};$$

$$l_a = 2,0 + 0,15 \approx 2,2 \text{ м}.$$

Расстояние между рядами анкеров принимаем 0,7 м. По номограмме (см. рис.3) находим сопротивление анкерной крепи $P_{а.к} = 200$ кН.

Определяем фактический периметр свода $L_{с.в} = \pi \cdot 5,5 / 2 = 8,6$ м. Расстояние от почвы выработки до пяты свода $h_1 = 2,0$ м. Тогда требуемое количество анкеров в ряду для крепления свода

$$\Pi_{к.св} = \frac{200 \cdot 8,6 \cdot 0,7}{60} = 20 .$$

При креплении боков выработки анкера устанавливаем по той же сетке, что и при креплении свода, тогда для крепления стенок необходимо $\Pi_{ст} = 2 \cdot 2 / 0,7 \approx 6$ анкеров.

Общее количество анкеров в ряду для крепления выработки сечением $S = 19$ м² по сетке $0,7 \times 0,7$ равно 26.

Выводы

1. В результате проявления зональной дезинтеграции пород вокруг выработки формируется квазислоистый массив, состоящий из чередующихся слоев разрушенных и ненарушенных пород, при этом размеры образовавшихся слоев и зон практически исключают

применение анкерной крепи, работающей по принципу «подвески». Вследствие этого устойчивость выработок может быть обеспечена путем формирования с помощью анкерной крепи несущего слоя пород принятой мощности.

2. Разработана методика определения параметров анкерной крепи горных выработок при проявлении зональной дезинтеграции пород, включающая определение скрепляемой анкерами мощности несущего слоя, длины анкеров, их количества и плотности установки в выработке в зависимости от глубины работ, количества образовавшихся зон, прочности пород на одноосное сжатие и ширины выработок.

3. Установлены значения коэффициента запаса, принимаемого при расчете несущего слоя породы по отношению к пределу ее прочности на одноосное сжатие, при этом с увеличением прочности породы с 60 до 200 МПа коэффициент запаса уменьшается с 1,80 до 1,04.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бадтиев Б.П. Обоснование и разработка технических решений по обеспечению устойчивости подготовительных выработок в предельно-напряженном блочном массиве рудников Талнаха: Автореф. дис...канд. техн. наук / Всесоюзный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела. СПб, 2001. 19 с.
2. Бадтиев Б.П. Научные основы крепления горных выработок при разработке блочных рудных массивов на больших глубинах / Б.П.Бадтиев, М.А.Розенбаум. Норильск, 2010. 239 с.
3. Бублик Ф.П. Методическое пособие по определению основных параметров систем разработки с короткими забоями для пологих пластов Кузбасса / Всесоюзный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела. Л., 1965. 83 с.
4. Глушихин Ф.П. Особенности разрушения горных пород на больших глубинах / Ф.П.Глушихин, М.А.Розенбаум, В.Н.Рева // Свойства горного массива и управление его состоянием: Сборник научных трудов / Всесоюзный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела. СПб, 1991. С.199-204.
5. Зональная дезинтеграция горных пород вокруг подземных выработок. Ч.3. Теоретические представления / Е.И.Шемякин, Г.Л.Фисенко, М.В.Курленя и др. // Физико-технические проблемы разработки подземных ископаемых. 1987. № 1. С. 3-8.
6. Зональная дезинтеграция породы вокруг горных выработок на больших глубинах / Э.А.Тропп, М.А.Розенбаум, В.Н.Рева, Ф.П.Глушихин; Физико-технический институт им А.Ф.Иоффе Академии наук СССР. Препринт 976. Л., 1985. 33 с.
7. Изучение проявлений горного давления на моделях / Г.Н.Кузнецов, М.Н.Будько, А.А.Филиппова, М.Ф.Шклярский. М.: Углетехиздат, 1959. 260 с.
8. Кузнецов Ю.С. Исследование влияния горногеологических факторов на проведение и поддержание капитальных выработок глубоких горизонтов Октябрьского и Талнахского месторождений: Автореф. дис...канд. техн. наук. Л., 1977. 19 с.
9. Макаров В.В. О зональном деформировании горных пород вокруг одиночных капитальных выработок // Механика подземных сооружений: Сборник научных трудов / Тульский политехнический институт. Тула, 1995. С.92-96.
10. Опарин В.Н. О некоторых закономерностях в напряженно-деформированном состоянии окрестностей горных выработок / В.Н.Опарин, И.Я.Елисоветский // Геофизические методы контроля напряжений в горных породах: Сборник научных трудов / Институт горного дела Сибирского отделения Академии наук СССР. Новосибирск, 1980. С.26-32.
11. Шемякин Е.И. Зональная дезинтеграция горных пород вокруг подземных выработок. Ч.1. Данные натурных наблюдений / Е.И.Шемякин, Г.Л.Фисенко, М.В.Курленя // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1986. № 3. С.3-15.
12. Явления зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е.И.Шемякин, М.В.Курленя, В.Н.Опарин, В.Н.Рева, Ф.П.Глушихин, М.А.Розенбаум // Диплом на открытие № 400. 1992.
13. Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е.И.Шемякин, Г.Л.Фисенко, М.В.Курленя и др. // Доклады Академии наук СССР. 1986. Т.289. № 5. С.1088-1094.

REFERENCES

1. Badtiev B.P. Obosnovanie i razrabotka tekhnicheskikh reshenii po obespecheniyu ustoichivosti podgotovitel'nykh vyrobotok v predel'no-napryazhennom blochnom massive rudnikov Talnakha; Avtoref. dis...kand. tekhn. nauk (*Reasoning and development of engineering design by stability mine workings at stress-deformed rock massif Talnahsky mine. Research Paper*), St Petersburg, Vsesoyuznyi nauchno-issledovatel'skii institut gornoi geomekhaniki i marksheiderskogo dela. 2001, p.19.

2. *Badtiev B.P., Rozenbaum M. Nauchnye osnovy krepleniya gornyykh vyrabotok pri razrabotke blochnyykh rudnykh massivov na bol'shikh glubinakh (Bracing scientific basis of mine workings at hardrock mining at great depths)*. Noril'sk, 2010, p.239.
3. *Bublik F. Metodicheskoe posobie po opredeleniyu osnovnykh parametrov sistem razrabotki s korotkimi zaboyami dlya pologikh plastov Kuzbassa (Technical guide of determination shortwall method at flat seams Kuzbass)*. Vsesoyuznyi nauchno-issledovatel'skii institut gornoj geomekhaniki i marksheiderskogo dela. Leningrad. 1965, p.83.
4. *Glushihin F.P., Rozenbaum M.A., Reva V.N. Osobennosti razrusheniya gornyykh porod na bol'shikh glubinakh (Features destructions of rocks at great depths)*. Svoystva gornogo massiva i upravlenie ego sostoyaniem. Sbornik nauchnykh trudov. Vsesoyuznyi nauchno-issledovatel'skii institut gornoj geomekhaniki i marksheiderskogo dela. St Petersburg, 1991, p.199-204.
5. *Shemyakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenya M.V. a.o. Zonal'naya dezintegratsiya gornyykh porod vokrug podzemnykh vyrabotok. Ch.3. Teoreticheskie predstavleniya (Zonal disintegration of rocks around underground workings. Ch.3. Theoretical idea)*. Fiziko-tekhnicheskije problemy razrabotki podzemnykh iskopae-mykh. 1987. N 1, p.3-8.
6. *Tropp E.A., Rozenbaum M.A., Reva V.N., Glushihin F.P. Zonal'naya dezintegratsiya porody vokrug gornyykh vyrabotok na bol'shikh glubinakh (Zonal deformation of rocks around single underground workings at great depths)*. Fiziko-tekhnicheskii institut im A.F.Ioffe Akademii nauk SSSR. Preprint 976. Leningrad, 1985, p.33.
7. *Kuznetsov G.N., Bud'kov M.N., Filippova A.A., Shkliarsky M.F. Izuchenie proyavlenii gornogo davleniya na modelyakh (Research on rock pressure manifestation at model)*. Moscow, Ugletekhizdat, 1959, p.260.
8. *Kuznetsov Yu.S. Issledovanie vliyaniya gornogeologicheskikh faktorov na provedenie i podderzhanie kapital'nykh vyrabotok glubokikh gorizontov Oktyabr'skogo i Talnakhskogo mestorozhdenii: Avtoref. dis...kand. tekhn. nauk. (Research on geological factors manifestation on mining and bracing underground workings at great depths Oktyabrsky and Talnakhsky minefield. Research Paper)*, Leningrad. 1977, p.19.
9. *Makarov V.V. O zonal'nom deformirovanii gornyykh porod vokrug odinochnyykh kapital'nykh vyrabotok (About zonal deformation of rocks around single underground workings)*. Mekhanika podzemnykh sooruzhenii: Sbornik nauchnykh trudov. Tul'skii politekhnicheskii institut. Tula, 1995, p.92-96.
10. *Oparin V.N., Elisovetsky I.Ja. O nekotorykh zakonomernostyakh v napryazhenno-deformirovannom sostoyanii okrestnosti gornyykh vyrabotok (Some of regularity at stress-deformed state of the around mine workings)*. Geofizicheskie metody kontrolya napryazhenii v gornyykh porodakh: Sbornik nauchnykh trudov. Institut gornogo dela Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR. Novosibirsk, 1980, p.26-32.
11. *Shemyakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenya M.V. Zonal'naya dezintegratsiya gornyykh porod vokrug podzemnykh vyrabotok. Ch.1. Dannye naturnykh nablyudenii (Zonal disintegration of rocks around underground workings. Ch.1. The data of based on field observations)*. Fiziko-tekhnicheskije problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, 1986, N 3, p.3-15.
12. *Shemyakin E.I., Kurlenya M.V., Oparin V.N., Reva V.N., Glushihin F.P., Rozenbaum M.A. Yavleniya zonal'noi dezintegratsii gornyykh porod vokrug podzemnykh vyrabotok (The phenomenon of zonal disintegration of rocks around underground workings)*. Find N 400, 1992. N 1, p.3.
13. *Shemyakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenya M.V. et al. Effekt zonal'noi dezintegratsii gornyykh porod vokrug podzemnykh vyrabotok (Effect of zonal disintegration of rocks around underground workings)*. Doklady Akademii Nauk SSSR. 1986. N 5, p.1088-1094.

DETERMENATION OF THE BOLTING PARAMETERS UNDER CONDITIONS OF THE ZONAL DISINTEGRATION OF ROCKS AROUND UNDERGROUND WORKINGS

M.A.ROZENBAUM, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, dav886@mail.ru*

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

B.P.BADTIEV, *Dr. of Engineering Sciences, Deputy Director of the Mining Department,*

B.badtiev@metalloinvest.com

LLC MC «Metalloinvest», Moscow, Russia

Recently the phenomenon of zonal disintegration of rocks had discovered at around underground workings at great depths. The main element of this fault concentric system that paralleled working profile.

The paper presents the method and formula determination of the bolted mine workings developed on stress-deformed rock massif at great depths at zonal disintegration of rocks around underground workings.

Key words: bolting, zonal disintegration of rocks, great depth, carrier layer, block massif.

Металлургия и обогащение

Metallurgy and mineral processing

УДК 669.273

ЭКСТРАКЦИЯ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА (III) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ТРИБУТИЛФОСФАТОМ

Л.А.ВОРОПАНОВА, *д-р техн. наук, профессор, lidia_metall@mail.ru*

Н.Б.КОКОЕВА, *аспирантка, lidia_metall@mail.ru*

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

Получены высокие показатели экстракции ионов железа (III) из водных растворов трибутилфосфатом при порционном введении экстрагента и минимальном времени контакта раствора и экстрагента. Порционное введение экстрагента повышает извлечение железа и сокращает расход экстрагента. Лучшие результаты экстракции получены из растворов с концентрацией 3н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температурой $t = 60$ °С. Дана принципиальная технологическая схема селективного извлечения ионов железа из водных растворов их солей.

Ключевые слова: железо, трибутилфосфат, раствор, соляная кислота, поваренная соль, экстракция, стадия.

Растворы, полученные при выщелачивании бедного сырья, растворы кучного и подземного выщелачивания, сточные воды, шахтные и рудничные воды содержат соли железа и цветных металлов. Селективное извлечение ионов железа и цветных металлов из таких растворов осаждением затруднено. Ионы Fe (II) осаждаются гидролитически совместно с основными ионами цветных металлов. Ионы Fe (III) осаждаются в более кислой области, но вместе с ними также осаждаются ионы цветных металлов и органические примеси, так как ионы Fe (III) являются коагулянтами [3].

В последнее время хлоридная гидрометаллургия находит применение в процессах выщелачивания полиметаллических концентратов [5]. Использование соляной кислоты вследствие повышенной ее способности к комплексообразованию интересно в схемах, включающих сорбционно-экстракционную технологию разделения металлов [6].

С помощью соляно-кислого выщелачивания при 70 °С и кислотности 250-350 г/дм³ HCl извлекается в раствор, наряду с другими металлами, железо. На первой стадии переработки раствора применяют неразбавленный трибутилфосфат (ТБФ) при соотношении органической О и водной В фаз 1:2. Железо извлекается на 99,9 % [6].

Исследована экстракция ионов железа и цинка трибутилфосфатом из индивидуальных растворов их солей [1, 2, 4, 6]. Установлено, что результаты экстракции ионов железа (III) и цинка (II) зависят от исходной концентрации металлов, кислотности, температуры, соотношения органической и водной фаз (О:В). Механизм экстракции связан с образованием в органической фазе трибутилфосфата хлоридных комплексов Fe (III) и Zn (II). ТБФ не экстрагирует ионы железа (II). Присутствие поваренной соли улучшает показатели экстракции. Лучшие результаты извлечения ионов Fe (III) получены из 3 М раствора соляной кислоты при соотношении О:В = 1:4 и содержании в растворе, г/дм³: 5,6 Fe (III) и 150 NaCl.

В данной работе исследована экстракция ионов железа ТБФ из водных растворов в зависимости от исходной концентрации железа, температуры, концентрации соляной кислоты, соотношения О:В.

Экстракцию осуществляли из растворов объемом $V_{\text{раст}} = 0,1$ дм³ с концентрациями поваренной соли $C^{\text{NaCl}} = 240$ г/дм³ NaCl и соляной кислоты $C^{\text{HCl}} = 2$ и 3 н, температурой 20 и 60 °С и различном соотношении объемов органической и водной фаз. Исходные растворы готовили растворением в дистиллированной воде кристаллогидратов соли FeCl₃·6H₂O.

В качестве экстрагента использовали трибутиловый эфир фосфорной кислоты $(C_4H_9O)_3PO$. Результаты экстракции оценивали остаточной концентрацией металла в рафинате в процессе экстракции в данный момент времени, извлечением в процентах по массе от исходного количества металла, на каждой стадии экстракции концентрацией металла в экстракте, коэффициентом распределения $D = C_{орг} / C_{вод}$, где $C_{орг}$ и $C_{вод}$ – концентрации ионов в органической и водной фазах соответственно, г/дм³.

Экстракцию проводили при постоянном перемешивании. Реэкстракцию осуществляли промывкой дистиллированной водой.

В табл.1 приведены результаты экстракции при использовании ТБФ объемом $V_{ТБФ} = 0,04$ дм³, $t = 20$ °С, $C^{HCl} = 3$ н, $C^{NaCl} = 240$ г/дм³, О:В = 2:5, время экстракции 10 мин.

В табл.2 даны результаты экстракции при порционном введении ТБФ при $t = 20$ °С, $C^{HCl} = 3$ н, $C^{NaCl} = 240$ г/дм³. Экстракцию осуществляли в пять стадий. На каждой стадии использовали ТБФ объемом $V_{ТБФ} = 0,02$ дм³, О:В = 1:5, суммарное использование объема ТБФ составило $V_{ТБФ} = 0,1$ дм³, Σ О:В = 1:1, время экстракции на каждой стадии 5 или 10 мин. Извлечение железа при большем времени экстракции на каждой стадии убывает.

Таблица 1

Экстракция из растворов хлоридов железа. Время экстракции 10 мин, $t = 20$ °С, О:В = 2:5, $C^{HCl} = 3$ н, $C^{NaCl} = 240$ г/дм³, $V_{раст} = 0,1$ дм³, $V_{ТБФ} = 0,04$ дм³

Стадия	Время, мин	Концентрация, г/дм ³		Извлечение, % по массе от исходного	D
		рафинат	экстракт		
1	0	24	0	0	0
	10	3,5	51,25	85,42	

Таблица 2

Экстракция из растворов хлоридов железа. Время экстракции на каждой стадии: 1-5 мин, 2-10 мин, $C^{HCl} = 3$ н, $C^{NaCl} = 240$ г/дм³, $V_{раст} = 0,1$ дм³, Σ О:В = 1:1, на каждой стадии $V_{ТБФ} = 0,02$ дм³, О:В = 1:5

Стадия	Концентрация, г/дм ³ , на каждой стадии				Извлечение, % по массе от исходного		D на каждой стадии	
	рафинат		экстракт		1	2	1	2
	1	2	1	2				
0	24,00	24,00	0	0	0	0	0	0
1	11,75	12,00	61,25	60,00	51,04	50,00	5,21	5,00
2	1,75	2,25	50,00	48,75	92,71	90,63	28,57	21,67
3	0,50	1,00	6,25	6,25	97,92	95,83	12,50	6,25
4	0,50	0,75	0	1,25	97,92	96,88	–	1,67
5	0,50	0,50	0	1,25	97,92	97,92	–	2,50

Сравнение результатов экстракции в одну стадию в течение 10 мин с использованием $V_{ТБФ} = 0,04$ дм³ (табл.1) и в две стадии (табл.2) по 5 мин (в сумме 10 мин) и по 10 мин (в сумме 20 мин) с использованием $V_{ТБФ} = 0,04$ дм³ позволяет сделать следующие выводы:

1) порционное введение экстрагента по 5 мин увеличивает извлечение железа с 85,42 до 92,71 % по массе, а по 10 мин до 90,63 % по массе соответственно. Молярное соотношение в экстракте ТБФ:Fe = 3:1;

2) увеличение времени экстракции на каждой стадии от 5 до 10 мин снижает извлечение железа с 92,71 до 90,63 % по массе.

В табл.3 даны результаты порционного введения экстрагента при $t = 20$ и 60 °С и времени экстракции на каждой стадии 10 мин из растворов с концентрациями: $C^{HCl} = 2$ н, $C^{NaCl} = 240$ г/дм³, $C_{исх} = 23$ и $47,25$ г/дм³ Fe, а также $C^{HCl} = 3$ н, $C^{NaCl} = 240$ г/дм³, $C_{исх} = 24$ и 50 г/дм³ Fe, на каждой стадии О:В = 1:5, всего Σ О:В = 1:1.

Экстракция из растворов хлоридов железа при порционном введении экстрагента
 $(C^{\text{NaCl}} = 240 \text{ г/дм}^3, V_{\text{раств}} = 0,1 \text{ дм}^3, \text{ на каждой стадии } V_{\text{ТБФ}} = 0,02 \text{ дм}^3, \text{ О:В} = 1:5, \text{ всего } \Sigma\text{О:В} = 1:1)$

Стадия	Время, мин	Концентрация, г/дм ³ , на каждой стадии				Извлечение, % по массе от исходного		D на каждой стадии	
		рафинат		экстракт		20 °С	60 °С	20 °С	60 °С
		20 °С	60 °С	20 °С	60 °С				
$C^{\text{HCl}} = 2\text{н}$									
0	0	23,00	23,00	0	0	0	0	0	0
1	10	12,00	11,75	55,00	56,25	47,83	48,91	4,58	4,78
2	10	4,00	3,00	40,00	43,75	82,61	86,96	10,00	14,58
3	10	1,25	0,75	13,75	11,25	94,57	96,74	11,00	15,00
4	10	0,75	0,75	2,50	0	96,74	96,74	3,33	–
5	10	0,75	0,50	0	1,25	96,74	97,83	–	2,50
$C^{\text{HCl}} = 3\text{н}$									
0	0	24,00	24,00	0	0	0	0	0	0
1	10	12,00	10,00	60,00	50,00	58,33	48,91	5,00	7,00
2	10	2,25	2,00	48,75	90,63	91,67	86,96	21,67	20,00
3	10	1,00	1,00	6,25	95,83	95,83	96,74	6,25	5,00
4	10	0,75	0,75	1,25	96,88	96,88	96,74	1,67	1,67
5	10	0,50	0,50	1,25	97,92	97,92	97,83	2,50	2,50
$C^{\text{HCl}} = 2\text{н}$									
0	0	47,25	47,25	0	0	0	0	0	0
1	10	35,50	35,75	58,75	57,50	24,87	24,34	1,65	1,61
2	10	26,25	24,75	46,25	55,00	44,44	47,62	1,76	2,22
3	10	17,25	15,25	45,00	47,50	63,49	67,72	2,61	3,11
4	10	10,00	6,00	36,25	46,25	78,84	87,30	3,63	7,71
5	10	5,50	2,50	22,50	17,50	88,36	94,71	4,09	7,00
$C^{\text{HCl}} = 3\text{н}$									
0	0	50,00	50,00	0	0	0	0	0	0
1	10	37,25	36,75	63,75	66,25	25,50	26,50	1,71	1,80
2	10	25,50	25,00	58,75	58,75	49,00	50,00	2,30	2,35
3	10	16,25	13,50	46,25	57,50	67,50	73,00	2,85	4,26
4	10	8,50	3,75	38,75	48,75	83,00	92,50	4,56	13,00
5	10	2,50	2,25	30,00	7,50	95,00	95,50	12,00	3,33

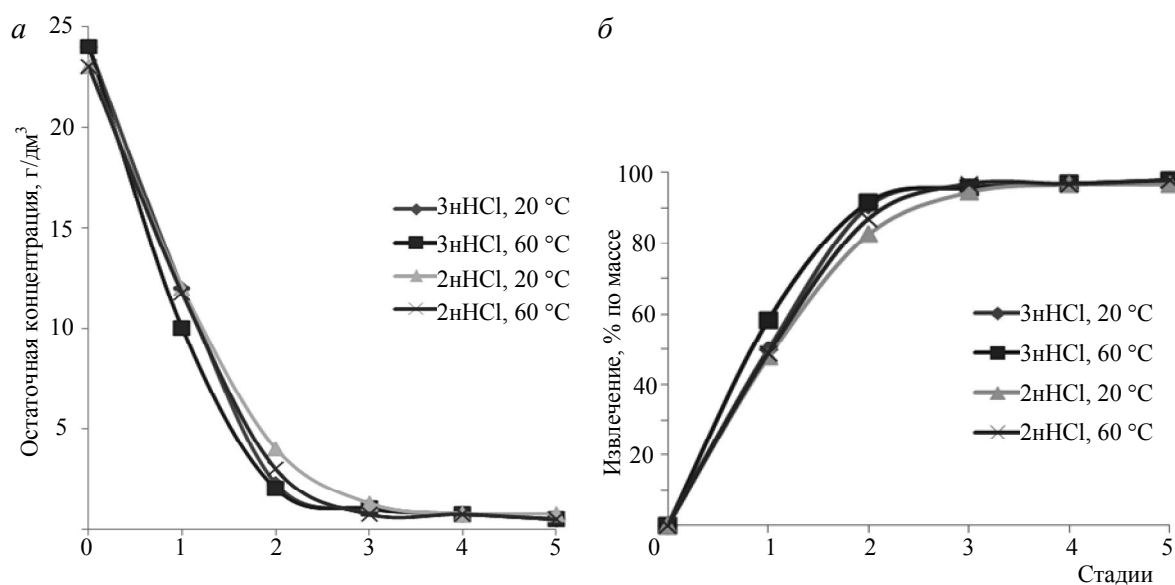


Рис.1. Результаты постадийной экстракции ионов железа (III) при $t = 20$ и 60 °С и времени экстракции на каждой стадии 10 мин (растворы с концентрациями $C^{\text{HCl}} = 2\text{н}$, $C_{\text{исх}} = 23 \text{ г/дм}^3 \text{ Fe}$ и $C^{\text{HCl}} = 3\text{н}$, $C_{\text{исх}} = 24 \text{ г/дм}^3 \text{ Fe}$); по данным табл.3: а – зависимость остаточной концентрации железа от числа стадий экстракции; б – зависимость извлечения железа от числа стадий экстракции

Экстракция из растворов хлоридов железа при разовом введении экстрагента
 ($C^{\text{NaCl}} = 240 \text{ г/дм}^3$, $V_{\text{раств}} = 0,1 \text{ дм}^3$, $V_{\text{ТБФ}} = 0,1 \text{ дм}^3$, $\text{O:B} = 1:1$)

Время, мин	Концентрация, г/дм ³				Извлечение, % по массе от исходного		D	
	рафинат		экстракт		20 °С	60 °С	20 °С	60 °С
	20 °С	60 °С	20 °С	60 °С				
$C^{\text{HCl}} = 2\text{H}$								
0	47,25	47,25	0	0	0	0	0	0
10	11,25	10,75	36,00	36,50	76,19	77,25	3,20	3,40
20	11,25	10,75	36,00	36,50	76,19	77,25	3,20	3,40
30	11,25	10,50	36,00	36,75	76,19	77,78	3,20	3,50
40	11,00	10,50	36,25	36,75	76,72	77,78	3,30	3,50
50	11,00	10,50	36,25	36,75	76,72	77,78	3,30	3,50
$C^{\text{HCl}} = 3\text{H}$								
0	50,00	50,00	0	0	0	0	0	0
10	11,00	9,25	39,00	40,75	78,00	81,50	3,55	4,41
20	10,00	9,25	40,00	40,75	80,00	81,50	4,00	4,41
30	10,00	9,25	40,00	40,75	80,00	81,50	4,00	4,41
40	9,50	8,75	40,50	41,25	81,00	82,50	4,26	4,71
50	9,50	8,75	40,50	41,75	81,00	82,50	4,26	4,71

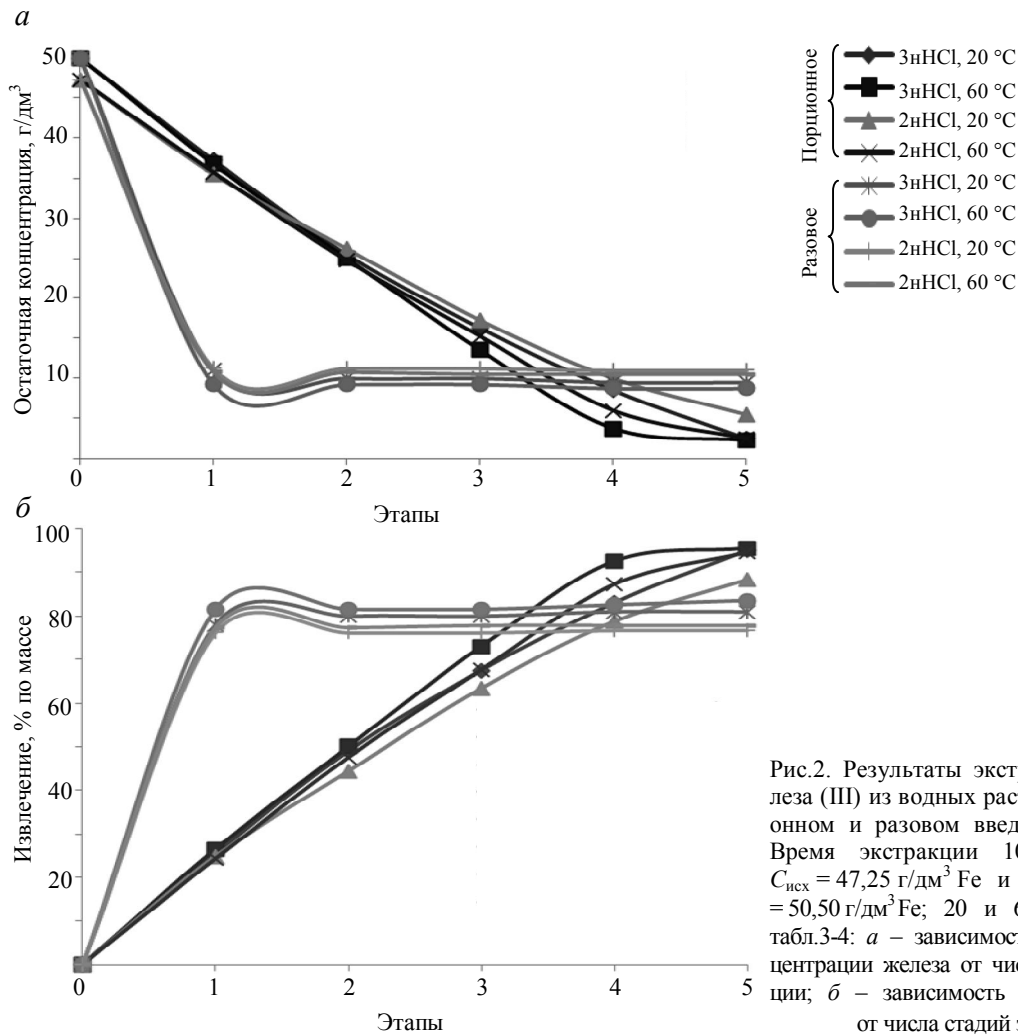


Рис.2. Результаты экстракции ионов железа (III) из водных растворов при порционном и разовом введении экстрагента. Время экстракции 10 мин ($C^{\text{HCl}} = 2\text{H}$, $C_{\text{исх}} = 47,25 \text{ г/дм}^3 \text{ Fe}$ и $C^{\text{HCl}} = 3\text{H}$ и $C_{\text{исх}} = 50,50 \text{ г/дм}^3 \text{ Fe}$; 20 и 60 °С); по данным табл.3-4: *a* – зависимость остаточной концентрации железа от числа стадий экстракции; *б* – зависимость извлечения железа от числа стадий экстракции

На рис.1 даны результаты постадийной экстракции при $t = 20$ и 60 °С и времени экстракции на каждой стадии 10 мин из растворов с концентрацией: $C^{\text{HCl}} = 2$ н, $C^{\text{NaCl}} = 240$ г/дм³, $C_{\text{исх}} = 23$ г/дм³ Fe и $C^{\text{HCl}} = 3$ н, $C^{\text{NaCl}} = 240$ г/дм³, $C_{\text{исх}} = 24$ г/дм³ Fe.

Из данных табл.3 и рис.1 можно сделать следующие выводы:

1. Разница в результатах экстракции для растворов с концентрацией $C^{\text{HCl}} = 2$ н и 3 н невелика, однако худшие результаты извлечения получены из растворов с концентрацией 2н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 20$ °С, лучшие – из растворов с концентрацией 3н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 60$ °С.

2. Извлечение железа 96,74 % осуществляется из растворов с концентрацией 2н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 60$ °С с исходной концентрацией 23 г/дм³ Fe на 3-й стадии: О:В = 3:5, ТБФ:Fe = 3,6:1.

3. Извлечение железа 95,83 % осуществляется из растворов с концентрацией 3н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 20-60$ °С с исходной концентрацией 24 г/дм³ Fe на 3-й стадии: О:В = 3:5, ТБФ:Fe = 2,9:1.

4. Кинетический порядок реакции в растворах с концентрацией 2н HCl равен единице, а с концентрацией 3н HCl – двум.

Сравнение результатов (табл.3) порционного введения экстрагента при $t = 20$ и 60 °С и времени экстракции на каждой стадии 10 мин из растворов с концентрациями: $C^{\text{HCl}} = 2$ н, $C^{\text{NaCl}} = 240$ г/дм³, $C_{\text{исх}} = 47,25$ г/дм³ Fe и $C^{\text{HCl}} = 3$ н, $C^{\text{NaCl}} = 240$ г/дм³, $C_{\text{исх}} = 50$ г/дм³ Fe, на каждой стадии О:В = 1:5, всего Σ О:В = 1:1, показало следующее:

1. Разница в результатах экстракции для растворов с концентрацией $C^{\text{HCl}} = 2$ н и 3 н невелика, однако худшие результаты извлечения получены из растворов с концентрацией 2 н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 20$ °С, лучшие – из растворов с концентрацией 3 н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 60$ °С.

2. Извлечение железа 94,71 % осуществляется из растворов с концентрацией 2 н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 60$ °С с исходной концентрацией 47,25 г/дм³ Fe на 5-й стадии: О:В = 1:1, ТБФ:Fe = 3,5:1.

3. Извлечение железа 95,5 % осуществляется из растворов с концентрацией 3н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 60$ °С с исходной концентрацией 50 г/дм³ Fe на 5-й стадии: О:В = 1:1, ТБФ:Fe = 3:1.

4. Кинетический порядок реакции равен нулю.

Анализ результатов разовой экстракции (табл.4) при $t = 20$ и 60 °С из растворов с концентрациями: $C^{\text{HCl}} = 2$ н, $C^{\text{NaCl}} = 240$ г/дм³, $C_{\text{исх}} = 47,25$ г/дм³ Fe и $C^{\text{HCl}} = 3$ н, $C^{\text{NaCl}} = 240$ г/дм³, $C_{\text{исх}} = 50$ г/дм³ Fe, $V_{\text{раств}} = 0,1$ дм³, $V_{\text{ТБФ}} = 0,1$ дм³, О:В = 1:1, показал следующее:

1. При разовом введении экстрагента экстракция завершается за 10 мин.

2. Худшие результаты извлечения получены из растворов с концентрацией 2н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 20$ °С, лучшие – из растворов с концентрацией 3н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 60$ °С.

3. Извлечение железа 77,78 % осуществляется из растворов с концентрацией 2н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 60$ °С с исходной концентрацией 47,25 г/дм³ Fe за 30 мин и О:В = 1:1, ТБФ:Fe = 5,6:1.

4. Извлечение железа 82,50 % осуществляется из растворов с концентрацией 3н HCl, 240 г/дм³ NaCl и температуре $t = 60$ °С с исходной концентрацией 50 г/дм³ Fe за 40 мин и О:В = 1:1, ТБФ:Fe = 5:1.

Анализ результатов экстракции при разовом и порционном введении экстрагента (рис.2, табл.3, 4) для растворов с концентрациями: $C^{\text{HCl}} = 2$ н, $C^{\text{NaCl}} = 240$ г/дм³, $C_{\text{исх}} = 47,25$ г/дм³ Fe и $C^{\text{HCl}} = 3$ н, $C^{\text{NaCl}} = 240$ г/дм³ и $C_{\text{исх}} = 50,50$ г/дм³ Fe при температурах 20 и 60 °С показал следующее:

1. Порционное введение ТБФ при минимальном времени контакта раствора и экстрагента позволяет практически полностью извлечь железо в первых порциях экстрагента.

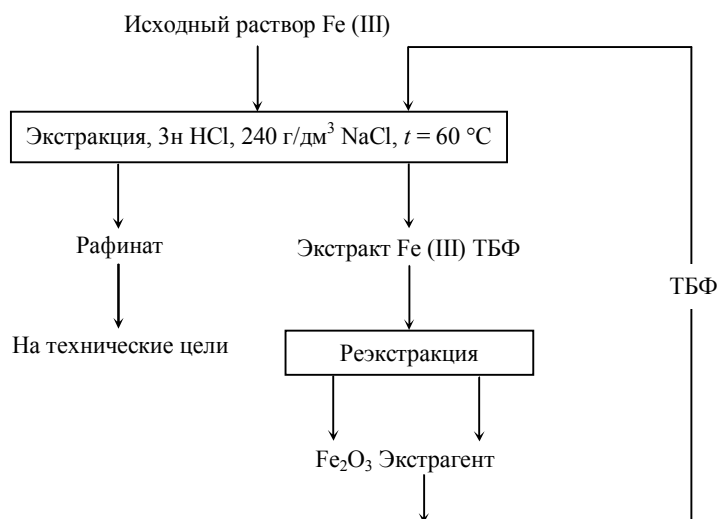


Рис.3. Принципиальная технологическая схема селективного извлечения ионов железа из водных растворов их солей

Таким образом, лучшие результаты экстракции получены при порционном введении экстрагента из растворов с концентрацией $3n$ HCl, 240 г/дм^3 NaCl и температурой $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ при минимальном времени контакта раствора и экстрагента.

2. Порционное введение экстрагента повышает извлечение железа в 1,14-1,22 раза.

3. Порционное введение экстрагента сокращает расход экстрагента: для получения одинакового результата экстракции при поэтапном введении экстрагента (время 40 мин) требуется $O:B = 4:5$, а при разовом введении экстрагента (время 10 мин) $O:B = 1:1$.

4. При регенерации каждой порции экстрагента можно сократить расход экстрагента в 5 раз.

Принципиальная технологическая схема извлечения ионов железа из водных растворов их солей приведена на рис.3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барвинюк Н.Г. Экстракция ионов цинка из водных растворов трибутилфосфатом / Н.Г.Барвинюк, Л.А.Воропанова, З.А.Суладзе // *Металлургия цветных металлов, проблемы и перспективы: Сб. тезисов докладов Междунар. науч.-практ. конференции*. М., 2009. С.214-215.
2. Барвинюк Н.Г. Экстракционное извлечение ионов железа и цинка при переработке твердых и жидких отходов / Н.Г.Барвинюк, Л.А.Воропанова, З.А.Суладзе // *Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Тезисы докладов IX Междунар. конф. Котону. Бенин. 13-19 сентября 2010 г.* С. 404-406.
3. Вольдман Г.М. Теория гидрометаллургических процессов / Г.М.Вольдман, А.Н.Зеликман. М.: *Металлургия*, 1993. С.303-307.
4. Воропанова Л.А. Исследования и разработка технологий переработки отходов предприятий цветной металлургии. Владикавказ: Изд-во «Мавр», 2013. С.240-243.
5. Набойченко С.С. Процессы и аппараты цветной металлургии / С.С.Набойченко, Н.Г.Агеев, А.П.Дорошкевич и др. УГТУ-УПИ. Екатеринбург, 2005. 700 с.
6. Резник И.Д. Кобальт / И.Д.Резник, С.И.Соболь, В.М.Худяков. М.: *Машиностроение*, 1995. Т.2. С.91-93.

REFERENCES

1. Barvinjuk N.G., Voropanova L.A., Suladze Z.A. Jekstrakcija ionov cinka iz vodnyh rastvorov tributilfosfatom (*Extraction of zinc ions from aqueous solutions by tributyl phosphate*). Metallurgija cvetnyh metallov, problemy i perspektivy: Sb. tezisov dokladov Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii. Moscow, 2009, p.214-215.
2. Barvinjuk N.G., Voropanova L.A., Suladze Z.A. Jekstrakcionnoe izvlechenie ionov zheleza i cinka pri pererabotke tverdyh i zhidkih othodov (*Extraction of iron and zinc ions when processing solid and liquid waste*). Resursovoproizvodjashhie, maloethodnye i prirodohrannnye tehnologii osvoenija nedr: Tezisy dokladov IX Mezhdunar. konf. Kotonu. Benin. 13-19 sentjabrja 2010, p.404-406.
3. Vol'dman G.M., Zelikman A.N. Teorija gidrometallurgicheskikh processov (*Theory of hydrometallurgical processes*). Moscow: Metallurgija, 1993, p.303-307.
4. Voropanova L.A. Issledovanija i razrabotka tehnologij pererabotki othodov predpriyatij cvetnoj metallurgii (*Research and development of technologies of waste treatment from enterprises of*). Vladikavkaz: Izd-vo «Mavr», 2013, p.240-243.
5. Naboichenko S.S., Ageev N.G., Doroshkevich A.P. et al. Processy i apparaty cvetnoj metallurgii (*on-ferrous metallurgy*). UGTU-UPI. Ekaterinburg, 2005, p.700.
6. Reznik I.D., Sobol' S.I., Hudjakov V.M. Kobal't (*Cobalt*). Moscow: Mashinostroenie, 1995. Vol.2, p.91-93.

EXTRACTION OF IRON (III) IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS WITH TRIBUTYL PHOSPHATE

L.A.VOROPANOVA, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, lidia_metall@mail.ru*

N.B.KOKOEVA, *Postgraduate student, lidia_metall@mail.ru*

*North Caucasian Institute Mining and Metallurgy Institute (State Technological University),
Vladikavkaz, Russia*

High rates of iron (III) ion extraction from aqueous solutions with tributyl phosphate by sequential injection of the extractant and minimal contact time of the solution and the extractant were obtained. The sequential injection of the extractant increases iron extraction and reduces the amount of the extractant used. The best extraction results were obtained from the solutions with concentration 3N HCl, 240 g/dm³ NaCl and temperature $t = 60$ °C. The flow sheet of the selective iron ions extraction from the aqueous solutions is presented.

Key words: iron, tributyl phosphate, solution, hydrochloric acid, sodium chloride, extraction, stage.

Электромеханика и машиностроение

Electromechanics and mechanical engineering

УДК 621.316.94

ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

АНХЕЛЬ ОСКАР КОЛУМБИЯ НАВАРРО, профессор, ректор, *anhel@ismm.edu.cu*

Высший горно-металлургический институт, Моа, Республика Куба

Я.Э.ШКЛЯРСКИЙ, д-р техн. наук, профессор, *js-10@mail.ru*

А.Н.СКАМЬИН, канд. техн. наук, ассистент, *askamin@yandex.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются вопросы эквивалентирования сложных электрических сетей промышленных предприятий. Сравниваются различные методы усреднения совокупности эквивалентируемых элементов системы электроснабжения: моментов, эквивалентного сечения, среднего значения параметра. Основным критерием при определении погрешности эквивалентирования электрической схемы является значение тока конденсаторной батареи в составе электротехнического комплекса предприятия. Рассматриваются вопросы эквивалентирования с помощью указанных методов при наличии высших гармоник в электрической сети предприятия. Сравнение методов эквивалентирования электрической сети при наличии высших гармоник показывает, что погрешность при расчете тока конденсаторной батареи меняется от 3,8 до 14,7 %, при этом наиболее точный метод эквивалентирования при определении перегрузки конденсаторной батареи – метод моментов.

Ключевые слова: высшие гармоники, эквивалентирование, перегрузка, конденсаторные батареи, компенсация, электрическая сеть, электрическая нагрузка.

Понятие «эквивалентирование» используется достаточно часто в процессе проектирования электрических комплексов и изучения реальных процессов работы электрических сетей. Применение понятия эквивалентирования обусловлено необходимостью упрощения математических расчетов, которые, несмотря на широчайшие возможности вычислительной техники, могут вызывать множество проблем. Эти проблемы связаны как с ограничением числа узлов при расчете схем электроснабжения, так и с проблемой сходимости расчетов.

Таким образом, рассмотрение вопросов эквивалентирования электрических сетей актуально и сегодня, особенно в условиях интенсивного внедрения современных частотно-регулируемых приводов, работа которых приводит к появлению гармонических искажений в напряжении и токе [5, 6, 7].

К эквивалентированию электрических сетей можно подходить с разных точек зрения, которые лежат в основе различных методов. Однако во всех методах присутствует одна общая черта, а именно – усреднение совокупности эквивалентируемых элементов системы. Операция усреднения может носить обобщенный или частичный характер.

Вопросам эквивалентирования схем электроснабжения посвящено достаточно много работ, однако, наличие явно выраженных высших гармоник требует нового подхода к эквивалентированию схем электроснабжения [1, 4, 6, 7]. Это вызвано прежде всего требова-

нием более точного по сравнению с существующими методами определения тока конденсаторной батареи (КБ), как наиболее уязвимого элемента электротехнического комплекса промышленных предприятий [2, 3].

Эквивалентирование электрической сети содержит следующие этапы:

- сбор первичной информации об эквивалентируемой системе, включающей структуру схемы электроснабжения, данные о параметрах сети, нагрузки и ступенях напряжения;
- на основе обработки данных, полученных на первом этапе, приведение схемы к виду с существенно меньшим числом элементов;
- определение наиболее рационального метода эквивалентирования, приводящего к наиболее точному решению поставленной задачи с применением схем замещения элементов, адекватно отображающих воздействие высших гармоник.

Сравним различные методы эквивалентирования сети без учета высших гармоник. За базисную схему замещения электрической сети возьмем рисунок, где количество ветвей m и ветвей n изменялось от 1 до 40.

На схеме замещения: U_0 – фазное напряжение источника рассматриваемой сети; P_{im} , Q_{im} – соответственно активная и реактивная мощности m -й линии напряжением 6кВ; P_{in} , Q_{in} – активная и реактивная мощности n -й линии низковольтного напряжения; $R_{im}^{(1)}$, $X_{im}^{(1)}$ – соответственно активное и реактивное сопротивление m -й линии; $R_{in}^{(1)}$, $X_{in}^{(1)}$ – соответственно активное и реактивное сопротивление n -й линии; $X_C^{(1)}$ – сопротивление системы; $R_{Трin}^{(1)}$ и $X_{Трin}^{(1)}$ – активное и реактивное сопротивление трансформатора; $X_{КБ}^{(1)}$ – реактивное сопротивление КБ. Все параметры приведены для первой основной гармоники.

Рассмотрим метод эквивалентирования, называемый *методом моментов*, который широко применяется при расчетах электрических цепей, представляющих собой схему замещения принципиальной схемы электроснабжения предприятия. Мощность нагрузки, как активной, так и реактивной, определяется суммированием их отдельных значений:

$$P_{\Sigma m} = \sum_{m=1}^M P_{im}; P_{\Sigma n} = \sum_{m=1}^M P_{in}; Q_{\Sigma m} = \sum_{m=1}^M Q_{im}; Q_{\Sigma n} = \sum_{m=1}^M Q_{in}. \quad (1)$$

Параметры эквивалентной сети на первой гармонике определяются по выражениям:

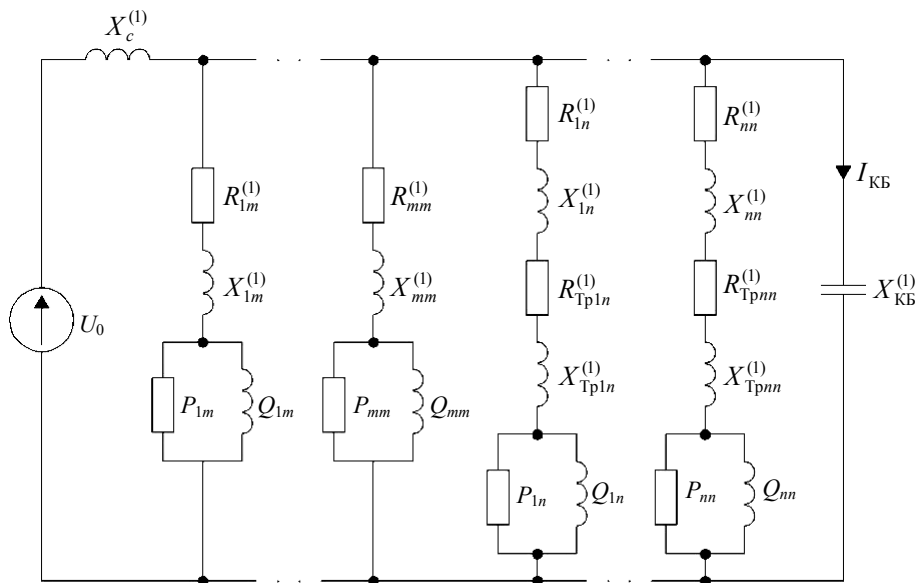


Схема замещения электрической сети

$$R_{\Sigma m}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i R_i^{(1)}}{\sum_{i=1}^N S_i}; \quad X_{\Sigma m}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i X_i^{(1)}}{\sum_{i=1}^N S_i}, \quad (2)$$

где $R_{\Sigma m}^{(1)}, X_{\Sigma m}^{(1)}$ – соответственно активное и реактивное сопротивление линии на первой гармонике; $S_{im} = \sqrt{P_{im}^2 + Q_{im}^2}$ – полная мощность i -го присоединения, для низковольтной линии ее параметры определяются аналогично и имеют индекс n .

Главным допущением в данном методе является неучет статических характеристик нагрузки. В результате расчета параметров схемы замещения электрической сети на рисунке, приведенной к среднему напряжению 6 кВ, содержащей m ветвей среднего напряжения и n ветвей низкого напряжения, было проведено сравнение токов КБ с результатами расчета тех же параметров эквивалентной схемы. Количество ветвей m и ветвей n изменялось в следующих пределах: $m = 1-40$; $n = 1-40$, что соответствовало стабилизации погрешности расчета тока КБ при увеличении m и n .

В результате расчетов максимальная погрешность эквивалентирования электрической сети по методу моментов при определении тока конденсаторной батареи может составить 3,4 %.

Далее рассмотрим *метод эквивалентного сечения*. Это математически обоснованный подход к эквивалентированию сечения линий передачи, но обладающий значительными недостатками.

Основным допущением, как и в методе моментов, является неучет статических характеристик нагрузки. Кроме этого, параметры схемы замещения эквивалентного трансформатора предлагается определить по его номинальной мощности

$$S_{\Sigma \text{Тр}} = \sum_{n=1}^N S_{i\text{Тр}}, \quad (3)$$

где $S_{i\text{Тр}}$ – номинальная мощность i -го трансформатора; N – общее количество трансформаторов.

В основу выбора эквивалентных параметров линии передачи положен принцип определения сечения по нагрузке.

Аналогично предыдущему методу были произведены расчеты для эквивалентной схемы замещения, сформированной по методу эквивалентного сечения с дальнейшим сравнением результатов с исходной непреобразованной схемой. На основе анализа полученных расчетных результатов можно утверждать, что максимальная погрешность в этом случае составит 13 %.

Рассмотрим *метод среднего значения параметра*. В его основе лежит принцип расчета среднего значения параметров эквивалентируемых сопротивлений кабельных линий и трансформаторов. Допущения в методе среднего значения параметров аналогичны допущениям в предыдущих методах.

Значения параметров определяются по следующим выражениям:

$$R_{\Sigma m}^{(1)} = \frac{\sum_{m=1}^M R_{im}^{(1)}}{M}; \quad X_{\Sigma m}^{(1)} = \frac{\sum_{m=1}^M X_{im}^{(1)}}{M}; \quad R_{\Sigma n}^{(1)} = \frac{\sum_{n=1}^N R_{in}^{(1)}}{N};$$

$$X_{\Sigma n}^{(1)} = \frac{\sum_{n=1}^N X_{in}^{(1)}}{N}; \quad R_{\Sigma \text{Тр}n}^{(1)} = \frac{\sum_{n=1}^N R_{\text{Тр}in}^{(1)}}{N}; \quad X_{\Sigma \text{Тр}n}^{(1)} = \frac{\sum_{n=1}^N X_{\text{Тр}in}^{(1)}}{N}. \quad (4)$$

В результате расчетов погрешность по методу среднего значения параметров составила 6,1 %.

Полученные результаты справедливы для схемы замещения, сформированной для воздействия только первой, основной гармоники. Оценим влияние высших гармоник в электрической сети на параметры элементов системы электроснабжения, включая асинхронную нагрузку, и на погрешность в зависимости от метода эквивалентирования.

Величина тока через КБ с учетом высших гармоник (ВГ) определяется выражением:

$$I_{\text{КБ}} = \sqrt{\sum_{k=1}^K I_{\text{КБ}}^{(k)2}} \quad (5)$$

Оценим погрешность, вносимую методом эквивалентирования, при расчете тока КБ при наличии ВГ. Поскольку ток на КБ определяется методом наложения, для каждого метода в отдельности погрешность с учетом высших гармоник будет рассчитываться по выражению

$$\delta I_{\text{КБ}} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (I_{\text{КБ}j} - I_{\text{КБ}})^2}}{I_{\text{КБ}}}; \quad I_{\text{КБ}j} = I_{\text{КБ}} (I_{\text{КБ}k} (I_{\text{КБ}k} + \Delta I_{\text{КБ}k})) \begin{cases} i = 1 - n \\ k \neq i \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases}; \quad I_{\text{КБ}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{\text{КБ}i}^2} \quad (6)$$

Определенная по выражению (6) погрешность с учетом высших гармоник до 40-го порядка (что превышает необходимые по ГОСТу 25 гармоник) и, учитывая спектр гармоник: по методу моментов – 3,8; по методу эквивалентного сечения – 14,7; по методу среднего значения параметров – 6,5.

Сравнение полученных результатов позволяет заключить, что при использовании метода моментов для эквивалентирования электрической сети промышленного предприятия с радиальной схемой электроснабжения с целью расчета токов КБ при наличии ВГ можно уменьшить погрешность расчета на 3,8 %.

Установлено, что с учетом только первой гармоники наименьшей погрешностью определения токов КБ обладает метод моментов (3,4 %). Метод эквивалентного сечения вносит погрешность 13 %, метод среднего значения параметров – 6,1 %.

Сравнение полученных данных тока КБ позволило разработать наиболее эффективный метод, основанный на методе моментов. Максимальная погрешность определения тока КБ для характерных параметров элементов электротехнического комплекса промышленных предприятий при наличии высших гармоник составила 3,8 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коровченко П.В. Эквивалентирование нагрузки в зависимости от спектра высших гармоник / П.В.Коровченко, А.Н.Скамьин // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 2. С.56-59.
2. Скамьин А.Н. Повышение эффективности функционирования конденсаторных батарей в электрической сети горного предприятия // Записки Горного института. 2011. Том 189. С.107-110.
3. Шклярский Я.Э. Снижение уровня высших гармоник в сетях промышленного предприятия / Я.Э.Шклярский, А.Н.Скамьин // Промышленная энергетика. 2012. № 8. С.44-47.
4. Andersson G. Modeling and Analysis of Electric Power Systems / EEN – Power Systems Laboratory. ETH Zurich. September 2008, 183 p.
5. Mahanty R., Kapoor A.K. Quasi-passive filter for harmonic filtering. Electric Power Systems Research (78). 2008, p.1456-1465.
6. Rios S., Naranjo A., Escobar A. Modeling of electrical systems in the presence of harmonics. IEEE Transactions on Power Systems (IX, 22). 2003, p.987-993.
7. Saša Vlahinić, Dalibor Brnobić, Dubravko Vučetić. Measurement and analysis of harmonic distortion in power distribution systems. Electric Power Systems Research. Vol.79, Issue 7. 2009, p.1121-1126.

REFERENCES

1. Korovchenko P.V., Skamyin A.N. Jekvivalentirovanie nagruzki v zavisimosti ot spektra vysshih garmonik (*Load equivalenting depending on the spectrum of high harmonics*). *Alternativnaja jenergetika i jekologija*, 2014. N 1, p.56-59.
2. Skamyin A.N. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija kondensatornyh batarej v jelektricheskoj seti gornogo predpriyatija (*Increasing the condenser battery efficiency in the electric network of mining enterprises*). *Zapiski Gornogo instituta*. 2011. Vol.189, p.107-110.
3. Shkljarskij Ja.E., Skamyin A.N. Snizhenie urovnja vysshih garmonik v setjah promyshlennogo predpriyatija (*High harmonic reduction in electric networks of industrial enterprises*). *Promyshlennaja jenergetika*. 2012. N 8, p.44-47.
4. Andersson G. Modeling and Analysis of Electric Power Systems / EEH – Power Systems Laboratory. ETH Zurich. September 2008, p.183.
5. Mahanty R., Kapoor A.K. Quasi-passive filter for harmonic filtering. *Electric Power Systems Research* (78). 2008, p.1456-1465.
6. Rios S., Naranjo A., Escobar A. Modeling of electrical systems in the presence of harmonics. *IEEE Transactions on Power Systems* (IX, 22). 2003, p.987-993.
7. Saša Vlahinić, Dalibor Brnobić, Dubravko Vučetić. Measurement and analysis of harmonic distortion in power distribution systems. *Electric Power Systems Research*. Vol.79. Issue 7. 2009, p.1121-1126.

ELECTRIC NETWORK EQUIVALENTING IN THE PRESENCE OF HIGH HARMONICS

ANGEL OSCAR COLUMBIE NAVARRO, *Professor, Rector, anhel@ismm.edu.cu*

Higher Institute of Mining and Metallurgy, Moa, Holguin, Cuba

Y.A.E.SHKLYARSKIY, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, js-10@mail.ru*

A.N.SKAMYIN, *PhD in Engineering Sciences, Assistant Lecturer, askamin@yandex.ru*

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article deals with equivalenting of complex electrical networks of industrial enterprises. In the article the different methods of averaging equivalenting elements in power systems are compared, specifically, the method of moments, the equivalent section method, and the average value method. The current value of the capacitor bank as part of the electrotechnical complex of the enterprise is the main criterion for determining the equivalenting error of the electric network. The equivalenting in the presence of high harmonics in electrical networks of the enterprise is considered by applying the methods under discussion. Comparison of these equivalenting methods in the presence of high harmonics shows that the error in the calculation of capacitor bank current ranges from 3,8 to 14,7 %. In addition, the most accurate method for determining the capacitor bank overload is the method of moments.

Key words: high harmonics, equivalenting, overload, capacitor bank, compensation, electric network, electric load.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВИБРОАКТИВНОСТИ ЭНЕРГОУСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И АНАЛИЗА РАЗМЕРНОСТЕЙ

О.К.БЕЗЮКОВ, *д-р техн. наук, профессор, okb-nayka@yandex.ru*

О.В.АФНАСЬЕВА, *канд. техн. наук, доцент, OVAf@rambler.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Одним из важнейших показателей технического состояния дизелей являются уровень и характер изменения параметров вибраций, как наиболее чувствительных к различным отклонениям технического состояния от нормы.

В статье рассматриваются методы оценки виброактивности двигателя, порождаемой газодинамическими и механическими факторами.

Рассмотрена возможность использования методов теории подобия и анализа размерностей при разработке новых и усовершенствовании уже имеющихся методов вибродиагностирования двигателей внутреннего сгорания (ДВС), что существенно повышает информативность процесса вибродиагностирования ДВС. Полученные критерии позволяют моделировать и исследовать влияние газодинамических процессов при сгорании топлива на уровень вибрации ДВС, учитывать влияние перекадки поршня на виброактивность дизеля и зависимость виброскорости от плотности материала и проводить замеры виброскорости на поверхности блока цилиндров.

Предложенные авторами методы положены в основу методики определения виброактивности дизелей, адекватной сложности указанного процесса и возможности виброизмерительной аппаратуры.

Ключевые слова: вибрация, критерии, теория подобия, анализ размерности, вибродиагностирование

Введение. Развитие минерально-сырьевого комплекса, в частности разведка и добыча, неразрывно связано с энергетическим обеспечением в условиях плохо развитой инфраструктуры районов. Это приводит к необходимости использования автономных энергетических систем, которыми являются дизель-генераторы.

Энергетическая доктрина России предлагает инновационный сценарий развития, в результате реализации которого Россия должна сыграть ключевую роль в мировой энергетике, а также восстановить звание сильного, независимого и новаторского государства, прежде всего в области нефтегазодобычи [4, 5].

В связи с этим заместитель директора по науке Института экономики и организации промышленного производства СО РАН член-корреспондент РАН В.И.Суслов утверждает, что, для того чтобы определить политику стимулирования инновационного развития, необходимо научиться однозначно и прозрачно измерять уровень инновационности, высокотехнологичности продукции, технологий, предприятий.

Однако эта задача может быть выполнена в полной мере только в том случае, если будет разработана методика оценки энергоэкологической эффективности, научно-технического уровня, качества и конкурентоспособности нефтегазодобывающего оборудования.

Отказоустойчивость дизель-генераторов в большинстве случаев связана с надежностью дизельного двигателя. Своевременная диагностика и ремонт существенно повышает надежность двигателей внутреннего сгорания [1, 7].

Одним из важнейших показателей технического состояния дизелей являются уровень и характер изменения параметров вибраций, как наиболее чувствительных к различным отклонениям технического состояния от нормы [3, 11].

Изменения в рабочем процессе дизелей достаточно точно отражаются на виброакустических характеристиках ДВС. Поэтому вибрация является не только источником повреждения дизелей и другого оборудования, но и средством оценки его технического состояния [1, 6].

Величина и характер вибрации двигателя зависят как от числа, величины, характера, места и способа приложения возмущающих сил, так и от свойств поршневой машины как колебательной системы [8, 10].

Известно, что основными источниками вибраций в дизелях являются цилиндропоршневая группа; процесс горения топлива; сочленения и контакты подвижных деталей; топливная аппаратура; механизм газораспределения; зубчатые передачи; система воздухообеспечения; система газораспределения; неуровновешенность движущихся деталей; крутильные колебания [12, 14].

Для исследования вибраций дизелей можно эффективно использовать методы теории подобия и размерностей [1, 13]. Эмпирические закономерности, установленные с их помощью, позволяют абстрагироваться от излишне детализированной информации и с очень хорошей точностью воспроизводятся на опыте [9, 15].

На основании анализа системы дифференциальных уравнений и краевых условий, описывающих исследуемое явление, находятся связи между отдельными группами величин, затем они соединяются в комплексы определенного вида. Эти комплексы, являясь комбинациями величин, которые существенны для изучаемых процессов, представляют собой обобщенные переменные (критерии подобия и симплексы).

Составление конкретных выражений критериев подобия основывается на выполнении следующих правил [5].

1. Преобразовать все переменные к безразмерному виду, выбрав соответствующие масштабы (множители пересчета) или, задаваясь каким-либо характерным значением переменной, разделить каждую переменную на это ее характерное значение.

2. Разделить все уравнения на величину одного из коэффициентов уравнения, чтобы каждый его член сделать безразмерным (вторичное приведение).

Теория размерностей используется, если вывести уравнения, отражающие с достаточной полнотой исследуемое явление, не удастся [5]. В этом случае исследование приходится строить на основе менее конкретных соотношений, используя результаты экспериментальных исследований. На основе этих исследований определяются величины, существенные для исследуемого процесса.

Метод анализа размерностей (теория размерностей) – математический метод определения вида формул, выражающих зависимость между физическими величинами в изучаемых явлениях, основан на рассмотрении размерностей этих величин [5, 6].

Представленные в работе исследования направлены на устранение этих пробелов, на основе более полного описания вибрационных процессов с помощью методов теории подобия и анализа размерностей.

Рассмотрим построение безразмерного комплекса применительно к втулкам и блоку цилиндров, вибрационное состояние которых в значительной степени характеризует колебательные процессы дизеля в целом [1, 5].

Критерий для оценки уровня вибраций втулок и блоков цилиндров, порождаемых процессами сгорания топлива. Известно, что определить параметры вибраций втулок цилиндров можно на основе уравнений динамики оболочек [1].

Рассмотрев задачу о вынужденных поперечных колебаниях шарнирно опертых по контуру оболочек при действии произвольной нагрузки p , можно получить известные уравнения вынужденных колебаний, которые имеют вид [5]

$$\left. \begin{aligned} D_{czvt} \nabla^2 \nabla^2 \xi + \nabla_k^2 \varphi + \rho h \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - p = 0; \\ \frac{1}{Eh} \nabla^2 \nabla^2 \varphi - \nabla_k^2 \xi = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\nabla^2 \nabla^2$ – бигармонический оператор Лапласа, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, $\nabla_k^2 = \frac{1}{k_2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{k_1} \frac{\partial^2}{\partial y^2}$; k_1, k_2 – главные радиусы кривизны оболочки; $p = p(x, y) \sin(\theta \cdot t)$ – внешнее воздействие на оболочку; D_{czvt} – цилиндрическая жесткость втулки цилиндра; ξ – виброперемещение; φ – функция напряжений; ρ – плотность материала; h – толщина втулки; E – модуль упругости; θ – частота вынужденных колебаний, равная частоте возмущающей нагрузки; t – время.

Перепишем систему (1) в виде

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{D_{czvt} \partial^4 \xi}{\partial x^4} + 2 \frac{D_{czvt} \partial^4 \xi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{D_{czvt} \partial^4 \xi}{\partial y^4} + \frac{k_2 \partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{k_1 \partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \rho h \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - p = 0; \\ \frac{\partial^4 \varphi}{Eh \partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{Eh \partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{Eh \partial y^4} - \frac{k_2 \partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{k_1 \partial^2 \xi}{\partial x^2} = 0. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Важно заметить, что в реальном дизеле втулка с одной стороны закреплена, а в другом месте шарнирно оперта, поэтому решение системы (1) приводит к детерминантам высоких порядков, раскрытие которых может быть весьма громоздким.

Решение уравнений (2) можно представить в виде зависимости безразмерных переменных от параметров системы (критериев).

Разделив первое уравнение в системе (2) на p и применив π -теорему, получим следующие безразмерные комплексы:

$$\begin{aligned} \pi_1 = \frac{D_{czvt} \xi}{p x^4}; \quad \pi_2 = 2 \frac{D_{czvt} \xi}{p x^2 y^2}; \quad \pi_3 = \frac{D_{czvt} \xi}{p y^4}; \\ \pi_4 = \frac{k_2 \varphi}{p y^2}; \quad \pi_5 = \frac{k_1 \varphi}{p x^2}; \quad \pi_6 = \frac{\rho h S}{p t^2}. \end{aligned}$$

Заметим, что аналогичные критерии получаются при рассмотрении, например, уравнения движения изотропной пластины под действием переменной нагрузки.

Особый интерес представляет второе выражение

$$\tilde{\pi}_2 = \frac{D_{czvt} \xi}{p x^2 y^2}. \quad (3)$$

Критерий $\tilde{\pi}_2$ может быть конкретизирован для случая оценки виброперемещения средней линии втулки цилиндра по координатам x, y .

Для этого проведем замену координат x, y основными геометрическими характеристиками ДВС – диаметром и ходом поршня, т.е. $x \rightarrow D_c, y \rightarrow S_n$.

Внешнее воздействие на оболочку заменим средним индикаторным давлением $p \rightarrow p_i$ или максимальным давлением цикла p_z .

В результате элементарных преобразований получим критериальное выражение

$$\tilde{\pi}_2 = \frac{D_{czvt} \xi}{S_n^2 D_c^2 p_i} = \bar{s} \frac{D_{czvt}}{S_n D_c^2 p_i}$$

или

$$\tilde{\pi}_2^* = \frac{D_{czvt} \xi}{S_n^2 D_c^2 P_z} = \frac{\xi}{S_n} \frac{D_{czvt}}{S_n D_c^2 P_z} = \bar{s} \frac{D_{czvt}}{S_n D_c^2 P_z},$$

где \bar{s} – относительное перемещение средней линии втулки цилиндра под воздействием процесса сгорания топлива в цилиндре двигателя.

Известно, что на параметры вибраций дизеля оказывает существенное влияние жесткость рабочего процесса [3, 5], которую можно учесть, введя в выражение (3) коэффициент динамичности рабочего процесса σ (отношение массы топлива, поступившей в цилиндр двигателя за период задержки воспламенения к его цикловой подаче).

Для анализа вибраций остова дизеля в целом, порождаемых газодинамическими процессами при сгорании топлива, учитывая, что более просто определяется максимальное давление цикла, для дальнейших исследований используем критерий в виде

$$\bar{s} = C_2 \frac{S_n D_c^2 P_z}{D_{czvt} + k D_{czb}},$$

где k – эмпирический коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей ДВС и демпфирующих свойств его материалов.

Данный критерий включает в себя такие характеристики как жесткость блока D_{czb} и втулки D_{czvt} цилиндров, максимальное давление цикла P_z ; ход поршня S_n ; диаметр цилиндра D_c .

В результате получен критерий, позволяющий оценить влияние на уровень вибраций втулок и блоков цилиндров газодинамических процессов при сгорании топлива.

Критерий, позволяющий учитывать зависимость виброскорости от плотности материала и проводить замеры виброскорости на поверхности блока цилиндров. Отметим, что такой же безразмерный комплекс можно получить, если рассматривать уравнения, описывающие поведение анизотропных прямоугольных пластинок, а также секториальных пластинки, анизотропных и изотропных, и пластинок переменной толщины.

Например, в работе [5, с.13] приводится уравнение движения изотропной пластины под действием переменной нагрузки $q(x, y, t)$:

$$\frac{D}{a^4} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{2D}{a^2 b^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{D}{b^4} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y, t) - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},$$

где a и b – размеры пластины в плане; w – функция нормального прогиба; ρ – плотность материала пластины; h – толщина пластины; D – цилиндрическая жесткость пластины; $q(x, y, t)$ – заданная произвольная поперечная нагрузка, зависящая также и от времени; x и y – безразмерные координаты в срединной плоскости пластины, так что $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$.

Разделив уравнение в системе (1) на q и применив π -теорему, получим следующие безразмерные комплексы:

$$\pi_1 = \frac{D_{czvt} w}{a^4 p x^4}, \quad \pi_2 = 2 \frac{D_{czvt} w}{a^2 b^2 q}, \quad \pi_3 = \frac{D_{czvt} w}{b^4 q y^4}, \quad \pi_4 = \frac{\rho h w}{q t^2}.$$

Заметим, что аналогичный критерий получается при рассмотрении задач теории тонких оболочек, теории ребристых пластин и оболочек.

Рассмотрим еще один безразмерный комплекс, полученный в результате анализа методами теории подобия уравнения движения изотропной пластины под действием переменной нагрузки $q(x, y, t)$:

$$\pi_4 = \frac{\rho h w}{q t^2},$$

где w – виброперемещение; h – толщина втулки; ρ – плотность материала; t – время.

Перепишем его в виде

$$\tilde{\pi}_4 = \frac{\rho h w n^2}{q},$$

где n – частота вращения коленчатого вала.

Тогда можно записать, что $q = \tilde{C} \rho h w n^2$ или $w = \frac{\tilde{C} q}{\rho h n^2}$.

Преобразуем этот критерий, используя режимные параметры дизелей. Представим q как максимальное давление цикла P_z . Критерий запишется в виде

$$\tilde{\pi}_4^* = \frac{\rho h w n^2}{P_z},$$

где P_z – максимальное давление цикла; w – виброперемещение; h – толщина втулки; ρ – плотность материала; n – частота вращения коленчатого вала.

Критерий подобия, учитывающий влияние перекладки поршня на виброактивность дизеля. Так как вибрационное состояние дизелей зависит также от ударов в зазорах трибосопряжений, был проведен анализ физических процессов, происходящих при перекладке поршня в дизелях, и их математических моделей [2].

Он показал, что основными параметрами, определяющими вибрации остова, порождаемые перекладками поршня, являются следующие:

1) жесткость

$$D_{czvt} = \frac{E h^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона;

2) величина зазора между тронком поршня и зеркалом втулки δ ;

3) нормальная сила, под воздействием которой поршень совершает боковое движение.

Для оценки общего уровня вибраций будем использовать максимальное значение боковой силы N_{\max} .

Используя методы теории размерностей, был построен критерий подобия для анализа вибраций деталей остова дизеля

$$\pi^* = \frac{N_{\max} \delta}{D_{czvt} + c D_{czb}}.$$

Данный критерий включает в себя такие характеристики как жесткость блока цилиндров D_{czb} , жесткость втулки D_{czvt} , максимальное значение боковой силы N_{\max} и величину зазора между тронком поршня и зеркалом втулки цилиндра δ ; эмпирический коэффициент c , зависящий от конструктивных особенностей ДВС и демпфирующих свойств его материалов.

Критериальное уравнение для расчета виброскорости. Для анализа зависимости уровня вибрации от вышеперечисленных характеристик было построено уравнение виброскорости, которое зависит от интенсивности как механического, так и газодинамического воздействия на детали остова [1, 6]:

$$\bar{V} = C_4 \omega S_n \left[\frac{P_z}{\rho h n^2} \right]^r \left[\frac{N_{\max} \delta}{D_{czvt} + c D_{czb}} \right]^t \left[\frac{S_n D_c^2 P_z}{D_{czvt} + k D_{czb}} \right]^m. \quad (5)$$

Уравнение учитывает такие важные конструктивные и режимных параметры как ход поршня S_n ; диаметр цилиндра D_c ; жесткости блока D_{czb} и втулки D_{czvt} цилиндров, величину зазора между тронком поршня и зеркалом втулки цилиндра δ ; максимальное давление цикла P_z ; максимальное значение боковой силы N_{\max} и угловую частоту ω , а также неизвестные коэффициенты C_4 , m , c , k , t и r , зависящие от конструктивных особенностей ДВС и демпфирующих свойств его материалов.

Заметим, что для определения неизвестных коэффициентов целесообразно использовать метод наименьших квадратов. Причем для достижения наибольшей точности определения параметров вибраций, следует определять коэффициенты в уравнении (5) методом наименьших квадратов, сгруппировав дизели, например, по номинальной частоте вращения коленчатого вала и удельной массе.

Методика определения коэффициентов критериального уравнения. Рассмотрим общие положения по определению неизвестных коэффициентов в уравнении (5), которое включает в себя пять неизвестных C_3 , m , c , k , и n , найти которые одновременно не представляется возможным.

Для каждого конкретного дизеля, его технического состояния и режима выражения в скобках в уравнении (5) представляют собой постоянные величины, поэтому для нахождения неизвестных целесообразно рассмотреть дополнительные вспомогательные уравнения.

Методика нахождения коэффициентов будет состоять из трех последовательных этапов.

На 1-м этапе представим в виде константы C_1 следующие сомножители: коэффициент C_4 , частоту ω , второе и третье выражение в скобках. В результате получим первое вспомогательное уравнение для определения неизвестных коэффициентов C_1 и c :

$$\bar{V} = C_1 S_n \frac{N_{\max} \delta}{D_{czvt} + c D_{czb}}. \quad (6)$$

Для нахождения конкретных значений неизвестных C_1 , c , выражение (6) целесообразно переписать в виде

$$\bar{V} D_{czvt} + \bar{V} c D_{czb} = C_1 \omega S_n N_{\max} \delta$$

или

$$c = \frac{C_1 \omega S_n N_{\max} \delta}{\bar{V} D_{czb}} - \frac{D_{czvt}}{D_{czb}}. \quad (7)$$

Пусть r – количество исследуемых дизелей.

Для удобства вычислений введем обозначения:

$$\frac{-S_n \omega N_{\max} \delta}{\bar{V} D_{czb}} := B, \quad \frac{-D_{czvt}}{D_{czb}} := D.$$

Заметим, что B и D – это одностолбцовые матрицы, каждая из которых состоит из r элементов.

Тогда последовательность уравнений (7) переписется в виде

$$c + B C_1 = D.$$

В итоге получена система из n уравнений с двумя неизвестными c и C_1 .

Для нахождения двух неизвестных в системе из r уравнений методом наименьших квадратов, вычисления целесообразно производить при помощи программы MathCAD PLUS 7.0 PRO, воспользовавшись процедурами «intercept» и «slope», позволяющими находить коэффициенты линейной регрессии.

В результате мы получили методику определения константы c в первых скобках выражения (5) и промежуточной константы C_1 .

На 2-м этапе аналогичным образом получим второе вспомогательное уравнение для определения неизвестных коэффициентов C_2 и k :

$$\bar{V} = C_2 S_n \frac{S_n D_c^2 P_z}{D_{czvt} + k D_{czb}}.$$

Коэффициенты k и C_2 находим аналогичным методом.

На 3-м этапе после того, как найдены коэффициенты c и k представляется возможным с помощью метода наименьших квадратов найти оставшиеся неизвестные C_4 , m , n и r в выражении (5). Для этого прологарифмируем (5) и получим

$$\ln \bar{V} = \ln(C_4) + \ln(\omega S_n) + r \ln \frac{P_z}{\rho h n^2} + m \ln \frac{S_n D_c^2 P_z}{D_{czvt} + k D_{czb}} + n \ln \frac{N_{\max} \delta}{D_{czvt} + c D_{czb}}.$$

Для простоты вычислений введем обозначения:

$$S = \ln \bar{V} - \ln(\omega S_n), \quad C = \ln(C_4), \quad A = \ln \frac{S_n D_c^2 P_z}{D_{czvt} + k D_{czb}}, \quad J = \ln \frac{N_{\max} \delta}{D_{czvt} + c D_{czb}}, \quad B = \ln \frac{P_z}{\rho h n^2},$$

где S , A , B и J – одно столбцовые матрицы, состоящие из x элементов; x – количество дизелей, для которых известны значения виброскорости.

Тогда уравнение (4) переписывается в виде

$$S = C + rB + nJ + mA. \quad (8)$$

Найти C , m , r и n можно с помощью метода наименьших квадратов. Для этого систему уравнений (8) запишем в матричном виде:

$$F \cdot Y = S, \quad (9)$$

где $Y = \begin{pmatrix} C \\ r \\ n \\ m \end{pmatrix}$; F – матрица, первый столбец которой составлен из коэффициентов при первом неизвестном C . Заметим, что все они равны единице. Второй столбец матрицы F состоит из коэффициентов при втором неизвестном r , третий столбец – из коэффициентов при третьем неизвестном n , четвертый – из коэффициентов при четвертом неизвестном m .

В соответствии с методом наименьших квадратов, умножив систему уравнений (9) на транспонированную матрицу F^T , слева, получим $F^T \cdot F \cdot Y = F^T \cdot S$.

Введем обозначения: $T = F^T \cdot F$ и $G = F^T \cdot S$, тогда система (9) переписывается в виде

$$T \cdot Y = G. \quad (10)$$

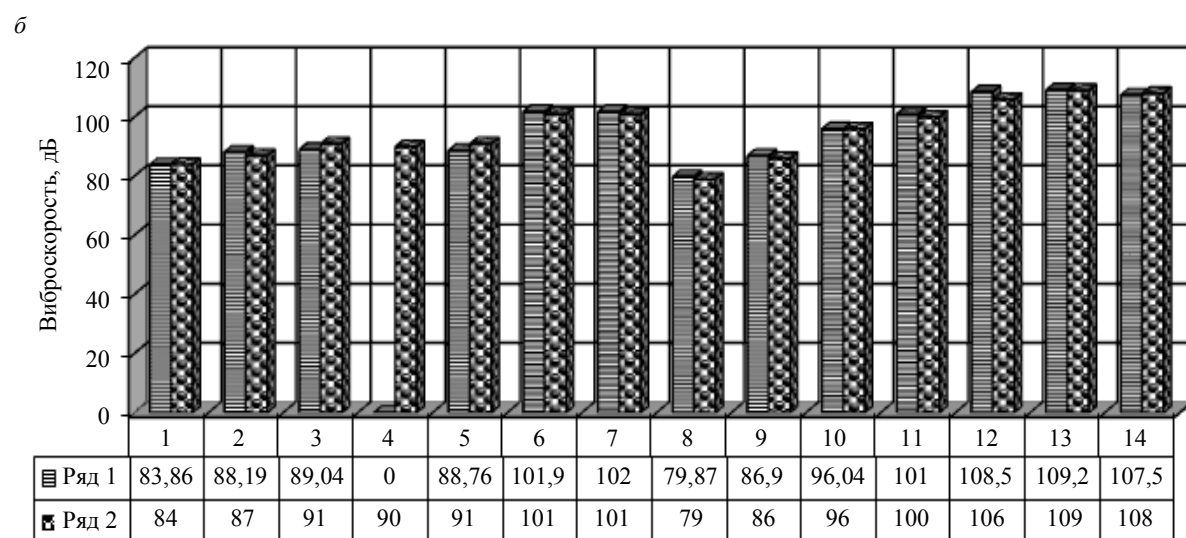
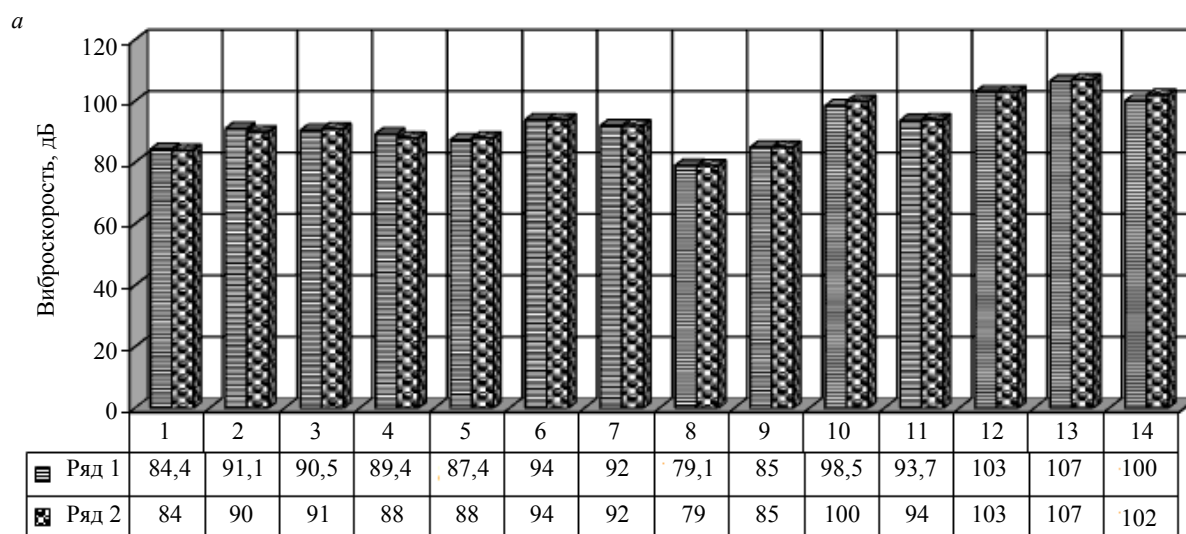
Для нахождения неизвестных будем решать систему уравнений (10) матричным способом, тогда $Y = T^{-1} \cdot G$.

Заметим, что уравнение для определения коэффициента C_3 в уравнении (8) представляет собой выражение $C_3 = \exp(C)$.

Пример решения прикладной задачи оценки виброактивности дизеля. Выражение (5) положено в основу метода вибродиагностирования дизеля, который позволяет определять величину диаметрального зазора между втулкой цилиндра и тронком поршня, рассчитывать текущую скорость изнашивания деталей цилиндропоршневой группы, более обоснованно выбирать периодичность технического обслуживания и ремонта дизелей.

Для проверки предлагаемого метода в качестве исходных данных были использованы значения виброскорости, измеренные на лапах 23 типов дизелей, приведенных в работе [5].

На рисунке представлены результаты расчета виброскорости с помощью уравнения (5), где приняты следующие обозначения: ряд 1 – значения виброскорости, вычисленные с помощью уравнения (5), коэффициенты которого находились по методике, представленной в работе [5]; ряд 2 – табличные средние значения виброскорости на частотах фильтрации 63, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц, приведенные в руководящем техническом материале (РТМ 212.0060-76) [5]. Исходные данные представлены в таблице.



Расчетные и экспериментальные значения виброскорости ряда дизелей, дБ: *a* и *б* – средняя частота октавных полос 250 и 500 Гц соответственно (1-14 – номера дизелей в таблице)

Характеристики исследуемых дизелей

№ п/п	Марка	N_e , кВт	n , мин ⁻¹
1	8NVD36	294	500
2	6L275Rr	276	500
3	6L275PN	515	600
4	6ЧНСП 25/34	331,2	500
5	6ЧНП 25/34	220	500
6	6ЧНСП 18/22	165,6	750
7	6ЧСП 18/22	110	750
8	6NVD26	132,4	750
9	6L160PNS	140	750
10	6ЧСПН 12/14(К-558-2)	92	1700
11	6ЧСПН 12/14 (К-461-1)	59	1500
12	12ЧСП 15/18(3Д12Н)	220,8	1500
13	12ЧСП 15/18(3Д12)	220,8	1500
14	6ЧСПН 15/18	173,6	1500

Примечание. N_e – эффективная мощность, кВт; n – номинальная частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

Из рисунка следует, что критериальное уравнение (5) приводит к погрешности вычисления виброскорости, колеблющейся от 4 до 7 %. При вычислении виброскорости, выраженной в децибелах, пороговый уровень был принят равным $5 \cdot 10^{-6}$ мм/с.

Заметим, что чтобы обеспечить высокую точность диагностирования, целесообразно рассчитывать коэффициенты в критериальном уравнении индивидуально для каждого типа дизеля с учетом степени его форсированности.

Выводы

Анализ парка дизелей показал, что для повышения надежности работы существующих малофорсированных, но физически изношенных и новых, высокофорсированных дизелей необходимо совершенствование методов и средств вибродиагностирования и расширение сферы их применения.

На основе анализа размерностей получены критерии, позволяющие оценить влияние на уровень вибраций втулок и блоков цилиндров процессов, происходящих при перекладке поршня в тепловом зазоре, и оценивать зависимость виброскорости от плотности материала.

На основе теоретического анализа уравнений, описывающих вынужденные колебания оболочек, с использованием методов теории подобия получен критерий, позволяющий оценить влияние на уровень вибраций втулок и блоков цилиндров, газодинамических процессов при сгорании топлива.

Предложено критериальное уравнение, полученное комбинацией ранее описанных критериев подобия, которое может быть положено в основу методики, позволяющей определять величину диаметрального зазора между втулкой цилиндра и тронком поршня, рассчитывать текущую скорость изнашивания деталей цилиндропоршневой группы и более обоснованно выбирать периодичность технических обслуживаний и ремонтов дизелей.

Непосредственное измерение вибраций на наружной поверхности втулки позволит упростить критериальное уравнение и повысить точность прогнозирования процесса изнашивания деталей цилиндропоршневой группы.

Из вышесказанного следует, что методы теории подобия и анализа размерностей – мощный инструмент, который может быть использован в целях диагностирования дизелей, прежде всего для исследования вибраций, порождаемых ударами в трибосопряжениях.

Авторы считают целесообразным проведение дальнейших исследований по разработке методов определения зазоров между деталями поршневой группы и в подшипниках коленчатого вала на основе измерений вибраций дизеля с учетом эластогидродинамических процессов в этих трибосопряжениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Афанасьева О.В.* Вибродиагностирование технического состояния судовых дизелей по критериям подобия: Автореф. дис...канд. техн. наук / Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций. СПб, 2004. 23 с.
2. *Безюков О.К.* Безразмерные комплексы для оценки виброактивности судовых дизелей / О.К.Безюков, О.В.Афанасьева // Эксплуатация морского транспорта. 2008. № 4. С.56-59.
3. *Ионов А.В.* Средства снижения вибрации на судах / Центральный научно-исследовательский институт им. акад. А.Н.Крылова. СПб, 2000. 348 с.
4. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2020 года и дальнейшую перспективу // Судостроение. 2007. № 6. С.7-11, 30-34, 44-47.
5. *Тузов Л.В.* Вибрация судовых двигателей внутреннего сгорания / Л.В.Тузов, О.К.Безюков, О.В.Афанасьева. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 348 с.
6. *Bezyukov O.K., Afanasyeva O.V.* Protection methods for ship crew and passengers against the vibration of power plants // Life Science Journal, 2014. № 11(5). P.483-486.
7. *Bezyukov O.K., Zhukov V.A., Zhukova O.V.* Effectiveness of Liquid Cooling Systems in Motors and Manufacturing Equipment // Russian Engineering Research, 2008. № 28(11). P.1055-1057.
8. *Di Carlo A.L., White N.C., Litovitz T.A.* Mechanical and Electromagnetic Induction of Protection Against Oxidative Stress // Bioelectrochemistry. 2001. Vol.53(1). P.87-95.
9. *Ferro V.* Deducing the Usle Mathematical Structure by Dimensional Analysis and Self-Similarity Theory // Biosystems Engineering, 2010. № 106(2). P.216-220.
10. *Hekl M.* The reference book on engineering acoustic / M.Hekl, H.A.Muller // Shipbuilding, 1980. P.440.
11. *Ionov A.V., Buvailo L.E., Volkova M.V., Starostin A.P.* Elastomer Materials in Ship Vibration and Noise Protection Means // Russian Journal of General Chemistry, 2010. Vol.80(10). P.2122-2133.
12. *Larin V.B.* Some Optimization Problems for Vibroprotective Systems // International Applied Mechanics, 2001. Vol.37(4). P.456-483.
13. *Putintsev S.V., Antonuk P.N., Chirsky S.P.* The use of the similarity theory for modeling and forecasting mechanical losses in piston engine // Dvigatlestroyeniye, 2011. Issue 3 (245). P.3-6.
14. *Scuria-Fontana C.* Fighting Vibration with Vibration // Mechanical Engineering, 1994. Vol.116(9). P.38.
15. *Serdobintsev Yu.P., Ivannikov A.V.* Force, Geometric and Design Factors at Accelerated Wear Tests // Journal of Friction and Wear, 1997. Vol.18(4). P.25-28.

REFERENCES

1. *Afanas'eva O.V.* Vibrodagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh dizelei po kriteriyam podobiya (*The vibration diagnostics for the technical condition of marine diesel engines by similarity criterion*): Avtoref. dis...kand. tekhn. nauk. Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet vodnykh kommunikatsii. St Petersburg, 2004, p.23.
2. *Bezukov O.K., Afanas'eva O.V.* Bezrazmernye komplekсы dlya otsenki vibroaktivnosti sudovykh dizelei (*Dimensionless complexes for the vibration activity assessment of marine diesel engines*). Eksploatatsiya morskogo transporta. 2008, N 4, p.56-59.
3. *Ionov A.V.* Sredstva snizheniya vibratsii na sudakh (*The means for vibration reduction in ships*). Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut im. akad. A.N.Krylova. St Petersburg, 2000. p.348.
4. Strategiya razvitiya sudostroitel'noi promyshlennosti na period do 2020 goda i dal'neishuyu perspektivu (*The development strategy for shipbuilding industry for the period until 2020 and further prospect*). Sudostroenie. 2007. N 6, p.7-11, 30-34, 44-47.
5. *Tuzov L.V., Bezukov O.K., Afanas'eva O.V.* Vibratsiya sudovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya (*The vibration of marine internal-combustion engines*). St Petersburg, Izd-vo Politekhnicheskogo un-ta, 2012, p.348.
6. *Bezyukov O.K., Afanas'eva O.V.* Protection methods for ship crew and passengers against the vibration of power plants. Life Science Journal. 2014. N 11(5), p.483-486.
7. *Bezyukov O.K., Zhukov V.A., Zhukova O.V.* Effectiveness of Liquid Cooling Systems in Motors and Manufacturing Equipment. Russian Engineering Research. 2008. N 28(11), p.1055-1057.
8. *Di Carlo A.L., White N.C., Litovitz T.A.* Mechanical and Electromagnetic Induction of Protection Against Oxidative Stress. Bioelectrochemistry. 2001. Vol.53(1), p.87-95.
9. *Ferro V.* Deducing the Usle Mathematical Structure by Dimensional Analysis and Self-Similarity Theory. Biosystems Engineering, 2010. N 106(2), p.216-220.
10. *Hekl M., Muller H.A.* The reference book on engineering acoustic. Shipbuilding, 1980, p.440.
11. *Ionov A.V., Buvailo L.E., Volkova M.V., Starostin A.P.* Elastomer Materials in Ship Vibration and Noise Protection Means // Russian Journal of General Chemistry, 2010. Vol.80(10), p.2122-2133.
12. *Larin V.B.* Some Optimization Problems for Vibroprotective Systems. International Applied Mechanics, 2001. Vol.37(4), p.456-483.
13. *Putintsev S.V., Antonuk P.N., Chirsky S.P.* The use of the similarity theory for modeling and forecasting mechanical losses in piston engine. Dvigatlestroyeniye, 2011. Issue 3 (245), p.3-6.
14. *Scuria-Fontana C.* Fighting Vibration with Vibration. Mechanical Engineering, 1994. Vol.116(9), p.38.
15. *Serdobintsev Yu.P., Ivannikov A.V.* Force, Geometric and Design Factors at Accelerated Wear Tests. Journal of Friction and Wear, 1997. Vol.18(4), p.25-28.

METHODS OF EVALUATION OF VIBRATIONAL ACTIVITY OF POWER PLANTS USING THE SIMILARITY THEORY AND DIMENSIONAL ANALYSIS

O.K.BEZYUKOV, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, okb-nayka@yandex.ru*

O.V. AFANAS'EVA, *PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, OVAf@rambler.ru*

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The level and the nature of changes of vibrational parameters are one of the most important indicators of the technical state of diesel engines as the most sensitive to various derivations from normal technical condition.

This article discusses methods of assessment of vibration activity of engines generated by gas-dynamic and mechanical factors.

The possibility of using the methods of similarity theory and dimensional analysis in the development of new and improvement of existing methods of vibrational diagnostic of internal combustion engines, which significantly increases the informativeness of vibrational diagnostic of the engine. These criteria allows to simulate and study the impact of gas dynamic processes in combustion of fuel on the vibration of internal combustion engines, consider the impact on the relocation of the piston on the vibration activity of diesel and dependence of vibration velocity on the density of the material and to carry out measurements of vibration velocity on the surface of the cylinder block.

The methods, that authors propose, are the basis for methods of determining of vibrational activity of diesel engines, are adequate to complexity of this process and to possibilities of measurement equipment.

Key words: vibration, criteria, similarity theory, dimensional analysis, vibration diagnostics.

КОМПЛЕКСНОЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН В ОСЛОЖНЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В.А.ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук, профессор, *teplot_energiy@spmi.ru*

Е.Л.ЛЕУШЕВА, канд. техн. наук, ассистент, *leusheva.ekaterina@mail.ru*

В.А.МОРЕНОВ, аспирант, *morenov@spmi.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены проблемы комплексного энергоснабжения процесса строительства скважин в осложненных климатических условиях. Предложен вариант утилизации попутного нефтяного газа в электроагрегатах для энергообеспечения буровых работ. Представлена методика расчета теплопотерь технологических объектов и требуемой тепловой мощности для поддержания рабочей температуры. Разработана когенерационная схема, позволяющая осуществлять одновременное электро- и теплоснабжение потребителей нефтяных месторождений путем использования попутного нефтяного газа в качестве топлива для энергогенерирующих агрегатов.

Ключевые слова: электроснабжение, теплоснабжение, бурение, попутный нефтяной газ, нефтепромысел, когенерация, микротурбины.

Энергоснабжение при бурении скважин на нефтяных и газовых месторождениях в сложных климатических условиях характеризуется повышенными потребностями электрической и тепловой энергии. Энергетические затраты на теплоснабжение производственных объектов, технологических и бытовых помещений могут в несколько раз превышать расход электрической энергии на привод бурового оборудования. При разработке месторождений в районах Крайнего Севера отопление потребителей должно производиться круглогодично, а в зимний период с повышенной интенсивностью и для большего количества объектов. В то же время, участились случаи нарушений электроснабжения в единой энергосистеме, увеличились тарифы на электроэнергию, выросла стоимость строительства линий электропередач, ухудшилось качество электроэнергии [1]. Удовлетворение нужд производства за счет использования централизованной энергосистемы в большинстве случаев экономически нецелесообразно по причине значительной удаленности строящихся объектов от существующих линий электропередач. Для энергоснабжения объектов как поискового, так и эксплуатационного бурения в большинстве случаев используются локальные электротехнические комплексы на базе дизель-генераторных установок (ДГУ). Теплоснабжение обеспечивается теплоэлектронагревателями и индивидуальными печами, которые увеличивают стоимость производимой энергии.

Проведенные исследования геологоразведочных работ в экстремальных условиях северо-восточных районов и Якутии [2] показали, что расход топлива на отопление здания буровой и буферной емкости для бурового раствора соответствует средней тепловой мощности 50-60 кВт, что обычно сопоставимо с количеством электрической энергии, затрачиваемой на работу бурового оборудования. В то же время при бурении нефтяных и газовых скважин затраты электрической энергии в десятки раз выше, чем при проведении геологоразведочных работ. Из-за большого количества производственных и бытовых помещений требуемый объем тепловой энергии может в несколько раз превышать потребности в электричестве. В связи с увеличением электрических и тепловых мощностей для энергоснабжения целесообразно применять более эффективные газогенераторные установки вместо дизельных электростанций, отличающихся высоким расходом дорогостоящего дизельного топлива.

Вместе с тем, разработка нефтяных месторождений сопровождается значительными объемами добычи попутного нефтяного газа (ПНГ). ПНГ – ценное сырье для нефтехимической отрасли и важный ресурс в энергетике, однако в большинстве случаев основная его часть сжигается в факелах. В то же время, введенные повышенные штрафы за сверхнормативное сжигание ПНГ вынуждают нефтегазовые компании более рационально подходить к вопросам утилизации. В Постановлении правительства Российской Федерации от 8 ноября 2012 г. № 1148 «Об особенностях исчисления платы за выбросы загрязняющих веществ, образующихся при сжигании на факельных установках и рассеивании попутного нефтяного газа» определяются обязательная утилизация попутного нефтяного газа при разработке месторождений в 95 %. Поэтому при кустовом способе разработки группы скважин для осуществления тепло- и электроснабжения целесообразно применять газовые энергогенерирующие установки, функционирующие на ПНГ, получаемом от введенных в эксплуатацию скважин. Также необходимо учитывать хроматографический состав газа индивидуальных скважин и его число Воббе (см. таблицу) для обеспечения безаварийной работы узлов энергоагрегатов и определения возможности взаимозаменяемости топлива [4].

Хроматографический состав и параметры ПНГ различных месторождений

Состав	Параметры										
	Метан	ПНГ 1	ПНГ 2	ПНГ 3	ПНГ 4	ПНГ 5	ПНГ 6	ПНГ 7	ПНГ 8	ПНГ 9	ПНГ 10
Метан CH_4 , %	100	76,39	74,33	83,47	66,85	73,3	84,65	75,87	92,37	82,18	89,93
Этан C_2H_6 , %	0	6,46	7,99	3,10	6,42	10,19	2,51	14,04	4,74	5,89	2,95
Пропан C_3H_8 , %	0	7,82	8,23	4,78	12,06	9,62	5,13	6,093	0,77	7,19	3,95
Изобутан $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$, %	0	1,62	1,56	1,14	2,65	0,96	1,31	0,76	0,02	0,75	0,91
Н-бутан $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$, %	0	2,63	3,23	2,07	5,37	2,25	2,73	1,39	0,02	1,30	0,15
Пентан C_5H_{12} , %	0	1,20	0,84	1,09	1,77	0,69	1,32	0,56	0,002	0,49	0,62
Гексаны и выше C_6H_{14} , %	0	0,74	0,22	0,65	0,24	0,34	0,46	0,24	0	0,22	0,35
Двуокись углерода CO_2 , %	0	1,15	1,60	2,77	2,62	0,8	0,21	0,12	0,37	0,69	0,67
Азот N_2 , %	0	1,99	2,00	0,93	2,00	1,85	1,61	1,13	1,64	1,29	0,5
Влагосодержание H_2O , %	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Плотность при 0 °С (273,15 К), $\text{кг}/\text{м}^3$	0,72	1,02	1,03	0,95	1,17	1,02	0,94	0,96	0,77	0,924	0,85
Низшая теплота сгорания, $\text{МДж}/\text{нм}^3$	35,88	47,25	47,08	43,19	52,43	47,45	44,62	45,87	36,97	43,65	40,73
Низшая теплота сгорания, $\text{МДж}/\text{кг}$	50,06	46,14	45,73	45,37	44,75	46,57	47,45	47,78	47,95	47,27	48,10
Число Воббе W_i , $\text{МДж}/\text{нм}^3$	48,19	53,09	53,76	50,33	55,08	53,45	52,32	53,23	47,88	47,88	50,33
Теоретический объем воздуха V_p , $\text{нм}^3/\text{нм}^3$	9,52	12,14	12,27	11,30	13,57	12,38	11,66	12,00	9,78	11,44	10,72

Наиболее эффективным способом эксплуатации газогенераторных установок является режим когенерации – одновременное производство электроэнергии и тепла (рис.1) [7].

Для утилизации попутного нефтяного газа в качестве энергоносителя возможно использовать газотурбинные установки (ГТУ) или газопоршневые агрегаты (ГПА). При выборе установок необходимо учитывать комплексные параметры эксплуатации энергетического комплекса, такие как номинальная мощность единичной установки $P_{\text{ном}}$, коэффициент технического использования $K_{\text{ти}}$, коэффициент загрузки установки K_3 и коэффициент, учитывающий потери тепловой мощности с уходящими выхлопными газами $K_{\text{вг}}$. Номинальная мощность устанавливается паспортом установки. Коэффициент технического

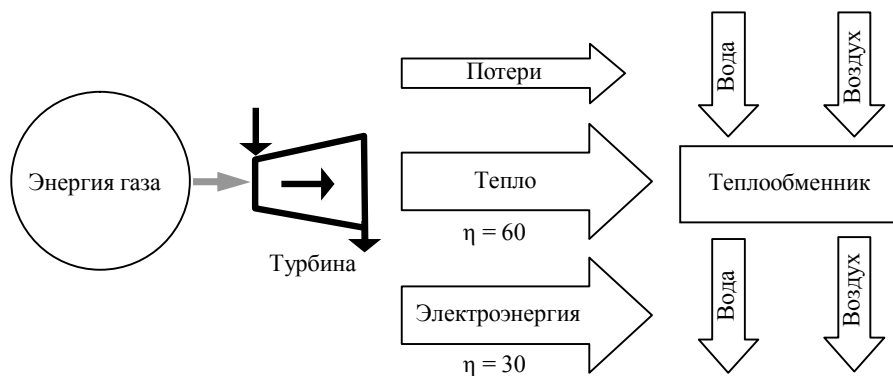


Рис.1. Схема процесса когенерации

использования определяется отношением времени рабочего состояния агрегата к времени рабочего состояния с учетом простоев и ремонтов. Коэффициент загрузки установки показывает фактический уровень вырабатываемой энергии (исходя от номинальной мощности). Коэффициент, учитывающий потери тепловой мощности с уходящими выхлопными газами, меняется в зависимости от конфигурации теплообменного аппарата.

Опыт эксплуатации ГТУ и ГПА нефтяными компаниями показал, что ГТУ обладают более высоким коэффициентом выработки тепловой энергии на 1 кВт произведенной электрической энергии, поэтому их применение является наиболее рациональным.

Тепловая мощность когенерации может быть определена по формуле

$$Q_{\text{ког}} = KnP_{\text{ном}}K_{\text{ти}}K_3K_{\text{вг}}, \quad (1)$$

где K – коэффициент выработки тепловой энергии на 1 кВт произведенной электрической энергии, для ГТУ $K = 2$, для ГПА $K = 1,5$; n – количество установок, находящихся в работоспособном состоянии.

Среди других достоинств ГТУ в данных условиях можно отметить широкий диапазон рабочих режимов, производительность, экологичность. Последней разработкой в области ГТУ являются микрогазотурбинные электроагрегаты (МГТЭА). Коэффициент полезного действия при генерации электричества таких машин достигает 35 %, что сравнимо со значениями дизельных и газопоршневых агрегатов [6].

В условиях низких температур атмосферного воздуха и высокой скорости ветра достаточное теплоснабжение необходимо как для обеспечения технологического процесса, а именно подогрева промывочной жидкости, так и для создания комфортных условий труда бригады бурильщиков. Одним из основных параметров теплового режима буровой вышки являются теплопотери. Конструкция бурового здания непосредственно влияет на количество тепла, рассеиваемого в окружающую среду. При эксплуатационном бурении применяют вышки высотой 53-54 м сборно-щитовой и каркасной конструкции.

Отличительной чертой работ в условиях Крайнего Севера является обшивка буровой вышки по периметру слоем брезента или рубероида. В конструкциях присутствуют технологические отверстия, общая площадь которых обычно составляет около 2 м². Основание вышки выполнено в виде площадки 10×10 м, в передней и задней гранях вышек имеются ворота высотой 10,5-12 м, состоящие из двух полураскосов. Из-за этих структурных особенностей большая часть теплопотерь в здании буровой будет приходиться на инфильтрацию холодного воздуха через технологические проемы и отверстия, а также на потери теплоты через изолирующие конструкции.

Теплопотери через отдельные изолирующие конструкции определяются как [2, 5]:

$$Q_{\text{очн}} = \sum_i^n (K_i F_i)(t_{\text{вн}} - t_{\text{н}})n_i, \quad (2)$$

где K_i – коэффициент теплопередачи ограждения, Вт/(м²·К); F_i – площадь отдельных ограждений, м²; $t_{\text{вн}}$ – температура внутри помещения, К; $t_{\text{н}}$ – расчетная температура наружного воздуха, К; n_i – поправочный коэффициент к расчетной разности температур.

Потери на инфильтрацию холодного воздуха можно определить по формуле:

$$Q_{\text{инн}} = \sum_{i=1}^n l_i a m c (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) + \omega S \rho c (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}), \quad (3)$$

где l_i – протяженность i -й щели, м; a – коэффициент, учитывающий время работы с открытыми технологическими проемами в течение смены, если проемы открыты не более 15 мин в смену, величина теплопотерь определяется как инфильтрация через щели с введением коэффициента $a = 3$ [3]; m – количество воздуха, проникающего через 1 м длины проема, кг/с; c – теплоемкость воздуха при температуре наружного воздуха, Дж/(м²·К); ρ – плотность воздуха при температуре наружного воздуха, кг/м³; ω – скорость потока воздуха, проникающего через технологические проемы, м/с; S – площадь сечения технологических проемов, м²; $t_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}$ – температура внутреннего и наружного воздуха, К.

Значительное количество теплоты также требуется для поддержания рабочей температуры бурового раствора. Несоблюдение теплового режима циркуляции может привести к льдообразованию на стенках скважины и появлению ледяных пробок в элементах обвязки. Поэтому необходимо обеспечивать подогрев бурового раствора в приемной емкости с учетом температуры окружающей среды. Необходимая тепловая мощность будет определяться количеством теплопотерь приемной емкости с раствором. При этом для расчетов устанавливается стационарная модель рассматриваемой системы, температура внутри емкости по всему объему принимается постоянной. Таким образом, удельную потерю теплоты в приемной емкости можно определить по формуле

$$Q_{\text{не}} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda (t_{\text{т}} - t_{\text{о}})}{d_i}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала емкости, Вт/(м·К); $t_{\text{т}}$ – температура теплоносителя внутри емкости, К; $t_{\text{о}}$ – температура воздуха в помещении приемной емкости, К; d – толщина i -й стенки емкости, м.

С учетом необходимой тепловой мощности для обеспечения функционирования бурового комплекса возможно создание когенерационного энерготехнологического комплекса на базе МГТЭА, позволяющего обеспечить энергетические нагрузки потребителя и снизить себестоимость производства энергии. В результате была разработана схема энергоснабжения производственных объектов при кустовом бурении с утилизацией тепла выхлопных газов ГТУ (рис.2).

Схема энергоснабжения работает следующим образом. МГТЭА I генерирует электрическую энергию для питания оборудования буровой. Выхлопные газы газовой турбины 1, имеющие высокую температуру, попадают в теплообменник 2 и отдают часть своего температурного потенциала воздуху, циркулирующему в системе воздушного отопления 4 за счет вентилятора 3. Нагретый воздух, попадая в здание буровой II, посредством конвекторов повышает температуру воздуха в рабочей зоне. Выхлопные газы после теплообменника, все еще имеющие достаточный температурный потенциал, попадают в змеевик 5, находящийся в буферной емкости III для бурового раствора, нагревая рабочий флюид.

Рассмотрим возможные теплопотери и потери на инфильтрацию холодного воздуха на примере буровой вышки ВБ-53-320, состоящей из девяти секций, с размерами верхнего

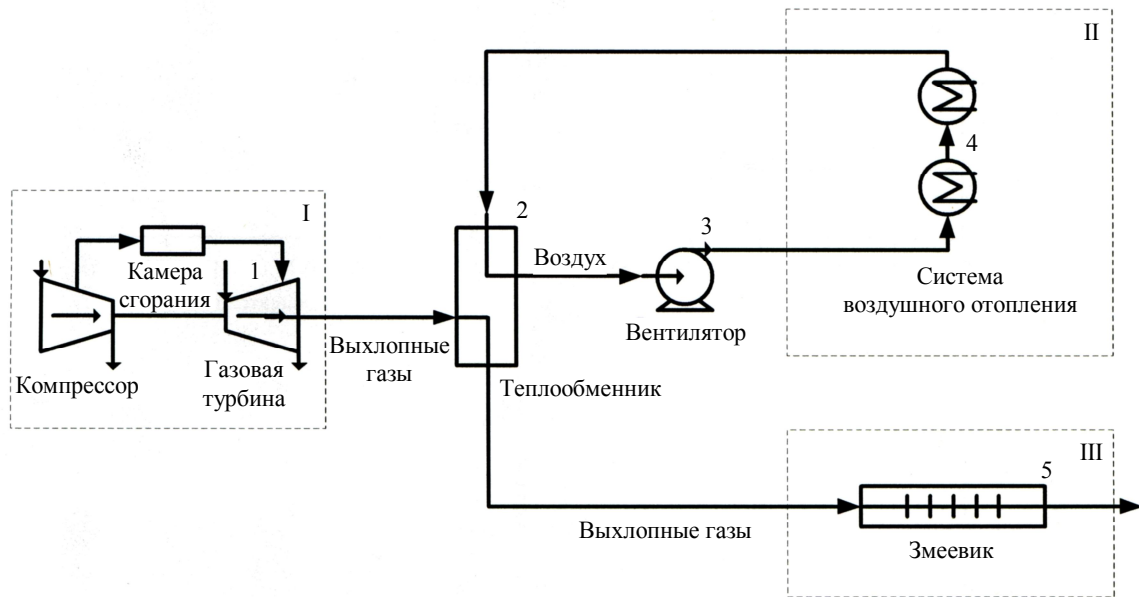


Рис.2. Принципиальная схема энергоснабжения производственных объектов

основания 2×2 м, нижнего – 10×10 м. Обшивка рабочей зоны производится изолирующими панелями на высоту 8 метров от пола нижнего основания. Для расчета возможных теплотерь примем следующие значения параметров: температура наружного воздуха -20 °С (253,15 К), при этом температура рабочей зоны для холодных условий должна составлять не менее $+10$ °С (283,15 К), скорость холодного воздуха, проникающего в рабочую зону, 2 м/с, общая площадь технологических проемов 2 м². При определении теплотерь емкости с раствором объемом 50 м³ (рассчитан для скважины глубиной 2000 м) рассмотрим в качестве материала углеродистую сталь (коэффициент теплопроводности 50 Вт/(м·К) с толщиной стенки 7 мм, а температуру воздуха в помещении приемной емкости примем равной 0 °С (273,15 К).

Теплотери через отдельные изолирующие конструкции (обшивка рабочей зоны), рассчитанные по формуле (2), составляют 30 кВт, потери на инфильтрацию холодного воздуха по формуле (3) – 1105 кВт. При расчете по формуле (4) получаем, что для емкости с раствором теплотери через стенки и днище емкости составляют 7 кВт без учета теплотерь через открытую верхнюю часть емкости. Таким образом, сумма теплотерь для буровой вышки и емкости равна 1142 кВт. При этом нужно учитывать необходимость обогрева блока приготовления и очистки бурового раствора, различных технических, подсобных и жилых помещений. В связи с этим количество необходимой тепловой энергии может возрасти в 1,5-2 раза [2].

Мощность привода бурового оборудования при различных глубинах строительства скважин:

Глубина бурения, м	До 2000	До 5000	Более 5000
Класс буровой установки	3	7	9
Электрическая мощность бурового оборудования, кВт	До 1100	До 2200	До 3400

Для электроснабжения потребителей при проведении буровых работ могут использоваться три типа энергоустановок:

Параметры	ДГУ Cummins C1400D5	ГПА FG Wilson PG1250B	МГТЭА Capstone 1000
Электрическая мощность, кВт	1000	1000	1000
Тепловая мощность, кВт		1363	2000
КПД по электричеству, %	40,9	38	33
Расход топлива, л/ч (дизельное топливо), м ³ /ч (газ) (дизельное топливо, 75 % нагрузки)	196	276 (газ)	325 (газ)

При комплексном обеспечении буровых работ электрической и тепловой энергией наиболее эффективным видом энергоагрегатов являются ГТУ и МГТЭА, которые в условиях работы на ПНГ отличаются более стабильной и надежной работой. Так, при использовании шести микротурбин фирмы «Capstone» номинальной мощностью по 200 кВт генерируется более 1 МВт электроэнергии и более 2 МВт тепловой энергии, что достаточно для обеспечения процесса бурения скважин глубиной до 2000 м при кустовом способе разработки месторождения.

Выводы

В результате реализации схемы комплексного энергоснабжения попутный нефтяной газ может быть эффективно утилизирован для повышения энергоэффективности процессов кустового бурения. Применение ГТУ в электротехническом комплексе позволяет наиболее полно и эффективно использовать потенциал первичного энергоносителя, что уменьшает себестоимость получения энергии и повышает экологичность ее производства. Внедрение автономных когенерационных энергоагрегатов актуально для районов, удаленных от линий централизованного электрообеспечения, при этом имеющих значительную потребность в тепловой энергии.

Исследования проводились в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4410.2015.5.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Игнатьев М.* Самоэнергообеспечение становится одной из самых актуальных отраслевых задач // Нефтегазовая вертикаль. 2004. № 5. С.72-74.
2. *Лимитовский А.М.* Энергообеспечение технологических потребителей геологоразведочных работ / А.М.Лимитовский, М.В.Меркулов, В.А.Косьянов. М.: ИПЦ «Маска», 2008. 135 с.
3. *Лимитовский А.М.* Электро- и теплоснабжение геологоразведочных работ / А.М.Лимитовский, А.Ю.Марков, М.В.Меркулов. М.: Недра, 1988. 150 с.
4. Особенности сжигания попутного нефтяного газа в газотурбинных установках / Б.А.Рыбаков, В.Д.Буров, Д.В.Рыбаков, К.С.Трушин // Турбины и дизели. 2008. № 5-6. С.2-8.
5. Разведочное бурение / А.Г.Калинин, О.В.Ошкордин, В.М.Питерский, Н.В.Соловьев. М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. 748 с.
6. *Boyce M.H.* Gas turbine engineering handbook. Elsevier inc., 2012, p.993.
7. *San Martin J.I.* Trigenation systems with fuel cells. Research Paper, retrieved 18 April, 2011. p.1-6.

REFERENCE

1. *Ignatiev M.* Samoenergoobespechenie stanovitsya odnoi iz samykh aktual'nykh otraslevykh zadach (*Energy self-sufficiency is becoming one of the urgent tasks in the industry*). Neftgazovaya Vertikal'. 2004. N 5, p.72-74.
2. *Limitovsky A.M., Merkulov M.V., Kosyanov V.A.* Energoobespechenie tekhnologicheskikh potrebitelei geologorazvedochnykh rabot (*Energy supply to technological consumers of geological surveys*). Moscow, IPC «Maska». 2008, p.135.
3. *Limitovsky A.M., Markov A.U., Merkulov M.V.* Elektro- i teplosnabzhenie geologorazvedochnykh rabot (*Electric and heat supply of geological prospecting*). Moscow, Nedra. 1988, p.150.
4. *Rybakov B.A., Burov V.D., Rybakov D.B., Trushin K.S.* Osobennosti szhiganiya poputnogo neftyanogo gaza v gazoturbinnnykh ustanovkakh (*Peculiarities of associated petroleum gas burning in gas turbine units*). Turbiny i dizeli. 2008. N 5-6, p.2-8.
5. *Kalinin A.G., Oshkordin O.V., Pitsersky V.M., Solovyev N.V.* Razvedochnoe burenie (*Exploration drilling*). Moscow, Nedra-Biznescentr. 2000, p.748.
6. *Boyce M.H.* Gas turbine engineering handbook. Elsevier inc., 2012, p.993.
7. *San Martin J.I.* Trigenation systems with fuel cells. Research Paper, retrieved 18 April, 2011, p.1-6.

COMPLEX POWER SUPPLY AT WELL DRILLING IN COMPLICATED CLIMATE CONDITIONS

V.A.LEBEDEV, *PhD in Engineering Sciences, Professor, teplot_energiy@spmi.ru*

E.L.LEUSHEVA, *PhD in Engineering Sciences, Assistant Lecturer, leusheva.ekaterina@mail.ru*

V.A.MORENOV, *Postgraduate student, morenov@spmi.ru*

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article deals with the problems of complex power supply of the well construction process in adverse climatic conditions. An option of associated petroleum gas utilization in power units for drilling operations is offered. The method of calculating heat losses of technological objects and required heating capacity for maintaining working temperature is given. A combined heat and power scheme enabling simultaneous electric and heat supply of oilfield objects with the use of associated petroleum gas as an energy source for power generation units is developed. Implementation of such a scheme guarantees power structure functioning without downfalls of produced energy during the year, thus maintaining high efficiency of overall power generation.

Key words: electric supply, heat supply, drilling, associated petroleum gas, oilfield, combined heat and power, microturbines.

ОБОСНОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТО-РЕЕЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ТЯЖЕЛО НАГРУЖЕННЫХ ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Л.В.ЛУКИЕНКО, *д-р техн. наук, профессор, lukienko_lv@mail.ru*

К.В.ГАЛЬЧЕНКО, *аспирант, lukienko_lv@mail.ru*

И.В.ЛИТВИНОВ, *аспирант, lukienko_lv@mail.ru*

Новомосковский институт (филиал) Российского химико-технологического университета им. Д.И.Менделеева, Россия

В статье представлены результаты исследований по обоснованию кинематических и силовых параметров зубчато-реечных движителей тяжело нагруженных горно-технологических машин. Показано, что для принятия конструктором более обоснованных конструктивных решений целесообразно проводить оценку изнашивания проектируемой передачи на стадии проектирования. Предложено применять дополнительные показатели качества зацепления: коэффициенты ускорения и скорости скольжения, а также коэффициент задиростойкости. Введение этих параметров позволит выбрать геометрические параметры проектируемых движителей, которые будут обладать наилучшими кинематическими и силовыми характеристиками и наименее склонны к изнашиванию.

Ключевые слова: зубчато-реечный движитель, горно-технологическая машина, изнашивание, коэффициент ускорения скольжения, коэффициент скорости скольжения.

Энергетической стратегией России на период до 2035 г. поставлена задача увеличения добычи угля в 1,28 раза при внедрении передового оборудования для добычи и транспортировки угля. Одно из направлений решения этой важной проблемы – применение зубчато-реечных передач в тяжело нагруженных горно-технологических машинах (очистных комбайнах, экскаваторах, стволопроходческих комплексах) обусловлено целым рядом их достоинств. Вместе с тем необходимость разработки горно-технологических машин, обладающих повышенным ресурсом, и возросшая конкуренция среди производителей горного машиностроения предполагают проведение комплекса исследований по совершенствованию методов проектирования и обоснованию кинематических и силовых параметров зубчато-реечных движителей тяжело нагруженных горно-технологических машин.

Известные методы конструирования позволяют определить основные параметры зубчато-реечных движителей лишь в проектном состоянии [1, 2, 4, 6] и не учитывают их изменения в процессе неизбежного изнашивания. При этом используемые качественные показатели (коэффициент запаса профиля, коэффициент неравномерности скорости подачи, силовой коэффициент) не дают возможности конструктору принять обоснованное решение при выборе параметров проектируемой передачи. Создание обоснованного теоретического метода выбора силовых и кинематических параметров с учетом изнашивания зубчато-реечных движителей тяжело нагруженных горно-технологических машин, подтвержденного результатами опыта эксплуатации, позволило бы разработать корректную методику прогнозирования ресурса зубчато-реечных движителей на стадии проектирования.

Поверхностная прочность зубьев тяжело нагруженной зубчато-реечной передачи по критерию заедания может быть охарактеризована коэффициентом задиростойкости и повышается при увеличении скорости качения либо уменьшении скорости скольжения [3]. Зависимость для расчета коэффициента задиростойкости имеет вид

$$\chi = \frac{r_0}{r_n - r_0},$$

где r_0 – радиус цевки цевочной рейки, мм; r_n – радиус профиля зуба колеса, мм.

Оценку влияния скорости скольжения на работоспособность проектируемой передачи целесообразно проводить по зависимости:

$$\xi = \frac{\omega_1 r_k (r_n - r_0)}{r_0 \sqrt{v_p^2 + v_1^2 - 2v_p v_1 \cos \left(a \tan \left(\frac{r_0 \cos(\gamma_i)}{a_{w2} - r_0 \sin(\gamma_i)} \right) \right)}}$$

Как известно, прогрессивное истирание материала поверхностного слоя взаимодействующих тел может быть объяснено ускоренным скольжением при перемещении одного тела относительно другого. Для количественной оценки этого явления целесообразно использовать коэффициент ускоренного скольжения:

$$\Omega = \frac{\frac{d}{d(\phi_1)} \left((r_n - r_0) \omega_1 \sqrt{\frac{r_{ц.п}^2 + r_n^2 - 2r_{ц.п} r_n \cos(\gamma_i - \phi_i + \pi/2)}{r_0}} \right)}{\frac{d}{d(\phi_1)} \sqrt{v_p^2 + v_1^2 - 2v_p v_1 \cos \left(a \tan \left(\frac{r_0 \cos(\gamma_i)}{a_{w2} - r_0 \sin(\gamma_i)} \right) \right)}};$$

$$r_k = \sqrt{r_{ц.п}^2 + r_n^2 - 2r_{ц.п} r_n \cos(\gamma_i - \phi_i + \pi/2)},$$

где $v_1 = \omega_1 r_k$ – скорость вращения зубчатого колеса; r_k – радиус окружности, на которой расположена точка контакта зуба колеса и цевки; $r_{ц.п}$ – радиус окружности, на которой расположены центры кривизны радиусов профилей зубьев колеса; γ_i – угол давления в зацеплении; ω_1 – угловая скорость вращения зубчатого колеса; a_{w2} – межосевое расстояние в паре зубчатое колесо – цевочная рейка; ϕ_i – угол поворота зубчатого колеса; $v_p = \omega_1 (a_{w2} - r_0 \sin \gamma_i)$ – скорость подачи горно-технологической машины.

Анализируя графики зависимости коэффициентов ускорения и скорости скольжения (рис.1), можно отметить, что коэффициент ускорения скольжения гораздо более чувствителен к происходящим изменениям при работе зубчатого колеса (изменяется за фазу зацепления на 93,3 %, тогда как коэффициент изменения скорости скольжения – на 41,7 %) и, таким образом, более полно в сравнении с коэффициентом скорости скольжения может охарактеризовать работу контактирующих элементов. При этом при проектировании необходимо стремиться к минимизации коэффициента ускорения скольжения.

Проведенный натурный эксперимент [5] по изучению изнашивания зубчато-реечных движителей в различных горно-геологических условиях показал, что они работают в условиях сухого трения, часто в присутствии абразивной среды, при колебании межосевого расстояния и значительном колебании действующих нагрузок. Основной причиной выхода из строя зубчато-реечных движителей является механическое изнашивание. При описании процесса изнашивания определяющими факторами являются геометрические и силовые параметры движителя (рис.2, а), необходимо также учитывать и трибологические характеристики взаимодействующих деталей. Процесс изнашивания элементов зубчатого колеса и рейки (рис.2, б) [7] может быть охарактеризован величиной скорости изнашивания, направленной по нормали к поверхности трения вглубь изнашиваемого материала и зависящей от режима работы рассматриваемой точки взаимодействующих профилей и свойств материала. Для решения задачи изнашивания рассмотрим ряд дискретных состояний, через

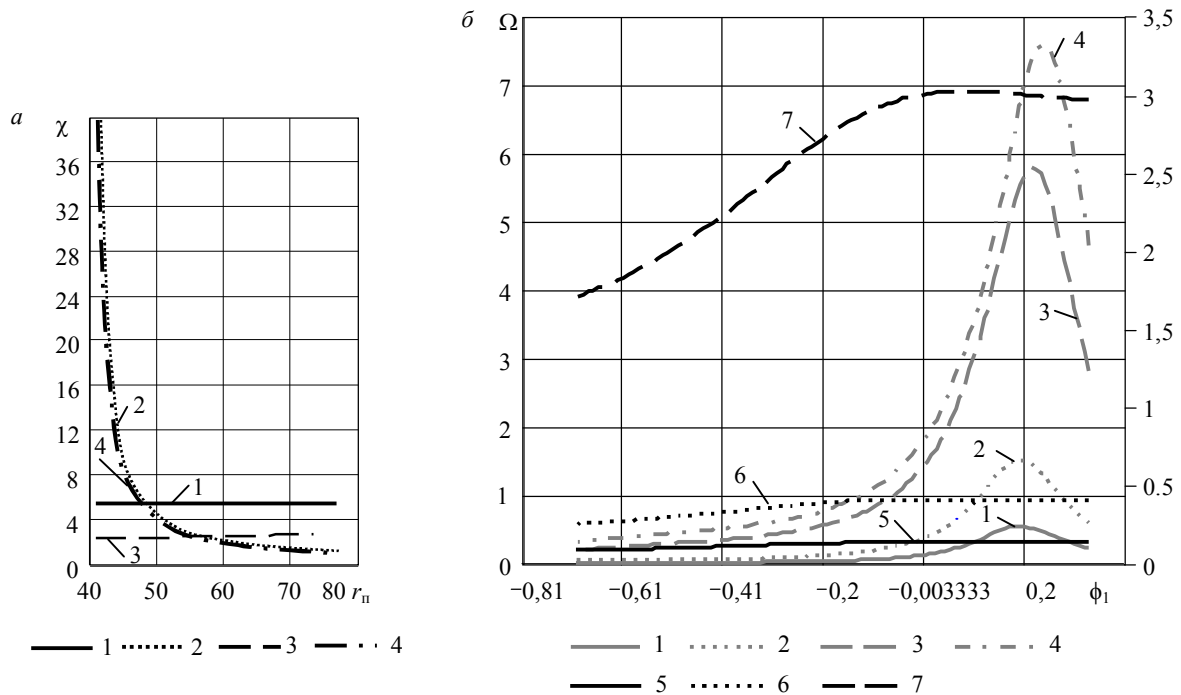


Рис.1. Зависимости коэффициента задиростойкости от радиуса профиля зуба колеса (а) и коэффициентов ускорения и скорости скольжения (б) от угла поворота колеса ($z = 17$, шаг зацепления рейки $p = 80$ мм)
а: 1 – $\chi(r_n)$; 2 – $\chi_1(r_n)$; 3 – $\chi_2(r_n)$; 4 – $\chi_3(r_n)$; б: 1 – $\Omega(\phi_1)$; 2 – $\Omega_1(\phi_1)$; 3 – $\Omega_2(\phi_1)$; 4 – $\Omega_3(\phi_1)$; 5 – $\zeta(\phi_1)$; 6 – $\zeta_1(\phi_1)$; 7 – $\zeta_2(\phi_1)$

которые проходит движитель за время его эксплуатации. Каждое последующее состояние контактирующих элементов отличается от предыдущего на величину износа за некоторый малый промежуток времени – шаг износа. В результате изнашивания за один шаг зубья колеса и рейки перейдут в новое состояние, при этом векторы износа и перемещений деталей совпадать не будут.

Чтобы обеспечить постоянство контакта, колесо должно повернуться на некоторый дополнительный угол, что приведет к нарушению характеристик работы машины. Оценка износа пары за один шаг может быть осуществлена с учетом распределения удельной нагрузки при контакте двух профилей с различными радиусами кривизны и упругими свойствами материала, а также известных закономерностей изнашивания материала.

Исходными данными для расчета на износ пары зубчатое колесо – цевочная рейка являются: шаг зацепления P_p , диаметр цевок $d_{ц}$, межосевое расстояние a_{w2-p} и диапазон его возможного варьирования Δa_{w2-p} , минимальное значение зазора в зацеплении J_{min} , радиус профиля зуба колеса r_{n2} , радиус окружности центров профилей зубьев колеса $r_{ц.п2}$, число зубьев z_2 и частота вращения колеса n_2 , толщина зубьев колеса b , суммарная длина реечного става L_p , крутящий момент на колесе $M_{кр2}$, коэффициент трения пары материалов колеса и рейки $f_{тр}$, модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов колеса E_2 и рейки E_3 , ν_2 и ν_3 , коэффициенты для определения интенсивностей изнашивания $J_{2i,k}$ материалов колеса и рейки $A_2, A_3, B_2, B_3, C_2, C_3, D_2, D_3$, максимально допустимая суммарная величина износа в паре колесо – рейка $\Delta h_{2-p \max}$, временной интервал шага износа δt , а также величины, определяемые из расчета геометрии зубчато-реечной передачи $\psi_{a2 \max}, \phi, \phi_2, \tau_2, r_{f2}, r_{в2}, y_0$.

Для анализа взаимодействия контактирующих профилей применим метод обращения движения: колесо вращается вокруг своей закрепленной оси, а рейка, под действием крутящего момента, передаваемого колесом, перемещается по касательной к окружности, на которой расположены центры профилей зуба колеса. Износ в i -й точке контакта зуба колеса за первый шаг определяется по зависимости

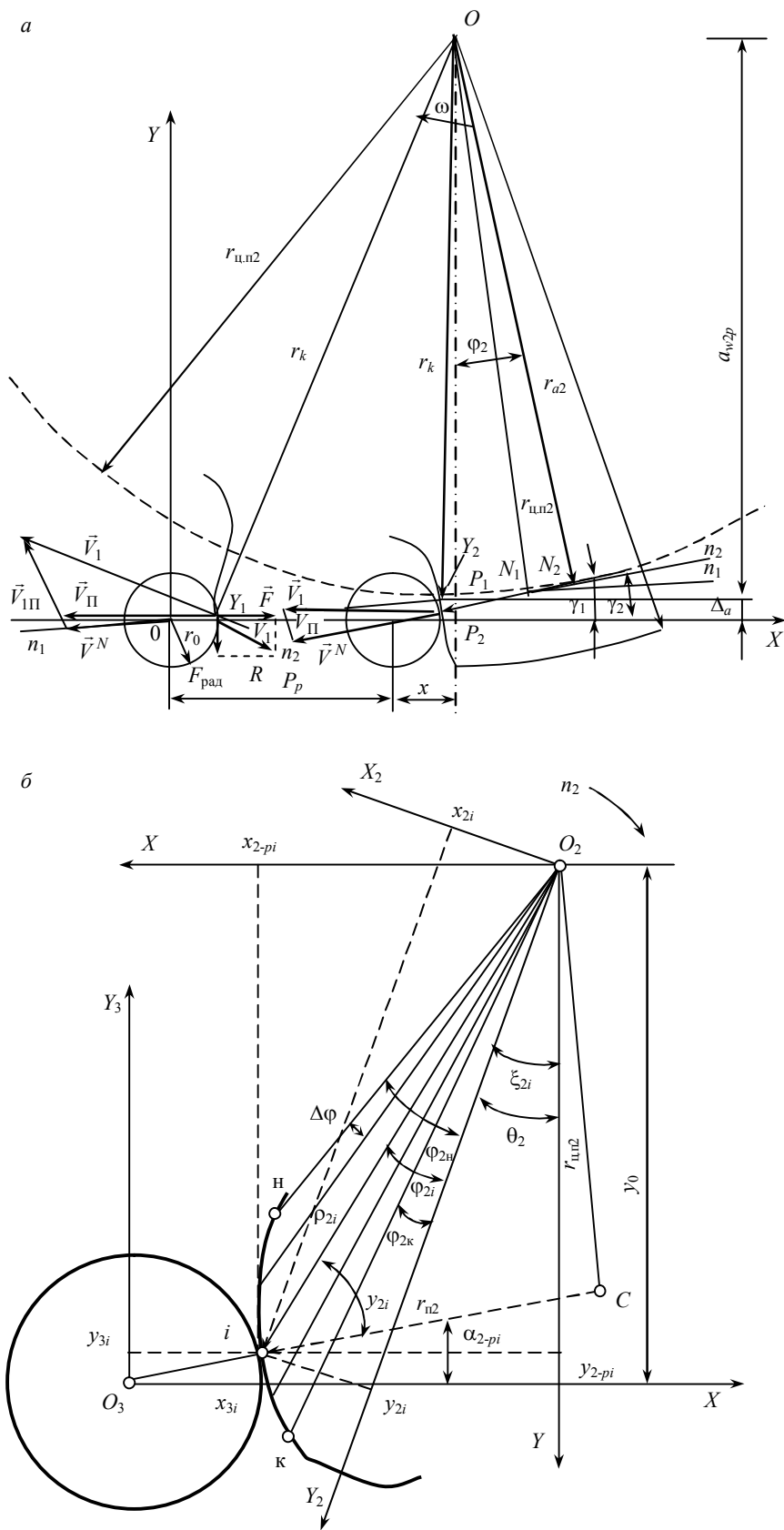


Рис.2. Расчетная схема к определению: *a* – силовых и кинематических параметров зубчато-реечной передачи; *б* – изнашивания зубчато-реечной передачи

$$h_{2i} = 2d_{2-pi} \left(1 + \frac{\sqrt{\rho_{2i-1}^2 + \rho_{2i}^2 - 2\rho_{2i-1}\rho_{2i} \cos(\Delta\varphi)} - \frac{|y_{3i} - y_{3i-1}|}{\cos \alpha_{2-p}}}{\sqrt{\rho_{2i-1}^2 + \rho_{2i}^2 - 2\rho_{2i-1}\rho_{2i} \cos(\Delta\varphi)}} \right) n_2 \delta t \sum_{k=1}^m J_{2i,k},$$

где d_{2-pi} – половина длины линии контакта профилей; $\Delta\varphi$ – угловой шаг для расчета на износ; n_2 – частота вращения колеса зубчато-реечного движителя; ρ_{2i} – радиус вектор i -й точки контакта; $J_{2i,k}$ – интенсивность изнашивания материала колеса.

Для определения величин интенсивностей изнашивания $J_{2i,k}$ материалов элементов движителей были проведены модельные стендовые исследования. Проведенный анализ показал, что наиболее подходящей является машина трения СМЦ-2, предназначенная для испытания материалов при механическом изнашивании в условиях трения качения при нормальных температурах.

Зависимость для определения интенсивности изнашивания материалов колеса и рейки (при коэффициенте корреляции 0,997 и погрешности разброса данных 3,8 % по механической составляющей изнашивания) имеет вид

$$J_{2i,k} = A_2 (B_2 P_{i,k}^3 + C_2 P_{i,k}^3 + D_2 P_{i,k}),$$

где A_2 – коэффициент абразивного ускорения износа материала колеса; B_2, C_2, D_2 – коэффициенты для определения механической составляющей изнашивания колеса; $P_{i,k}$ – контактная нагрузка в паре колесо – рейка движителя.

В работе [7] получены значения коэффициентов B_2, C_2, D_2 для различных сочетаний марок сталей и видов термообработки, применяемых для изготовления движителей БСП.

Передача достигает предельного состояния при выполнении условия

$$(h_{2i} + h_{3i}) = \Delta h_{2-p \max},$$

где $(h_{2i} + h_{3i})$ – суммарная величина износа контактирующих элементов; $\Delta h_{2-p \max}$ – максимально допустимый износ.

Подход к решению задачи моделирования процесса изнашивания пары шестерня – зубчатое колесо аналогичен примененному при расчете пары зубчатое колесо – рейка. Принятый способ разбиения линии контакта деталей позволяет разработать единую модель процесса изнашивания трехэлементного движителя за счет использования угла поворота радиус-вектора, определяющего положение текущей точки контакта рабочих профилей сопряженных деталей в подвижной системе координат, жестко связанной с зубом колеса. Это обеспечивает достаточно точное моделирование работы исследуемых движителей БСП высокопроизводительных очистных комбайнов. Методика позволяет через шаг износа определять координаты точек контакта изношенных профилей деталей. Причем учитывается, что в процессе одного шага износа в трехэлементном движителе изнашиваются оба профиля зуба зубчатого колеса (один – при взаимодействии с зубом шестерни, второй – при контакте с зубом или цевкой рейки). Каждый такой процесс моделируется отдельно.

По окончании шага износа характер взаимодействия контактирующих профилей меняется. При этом пересчету и коррекции подлежат развиваемые системой усилие подачи F_{Π} и скорость перемещения комбайна V , зависящие непосредственно от также подлежащих пересчету крутящего момента на зубчатом колесе $M_{кр}$ и частоты вращения колеса n_2 . Контролируемыми величинами при расчете трехэлементного движителя являются колебания усилия подачи и скорости перемещения комбайна, прочность зубьев шестерни и колеса, а также величины максимальных износов зубьев и цевок, которые не должны превышать уста-

новленных предельных значений. По достижении какой-либо характеристики своего предела расчет прекращается и определяется ресурс трехэлементного движителя БСП очистного комбайна.

Изменение усилия подачи за фазу зацепления может быть оценено по зависимости, учитывающей процесс изнашивания контактирующих элементов:

$$F_{ni} = \frac{M_{кр2} \cos \left(\arctg(f_{тр}) - \frac{x_{2-pi}}{|x_{2-pi}|} \alpha_{2-p} \right)}{\rho_{2i} \cos \left(\xi_{2i} + \varphi_{2i} + \alpha_{2-p} - \frac{x_{2-pi}}{|x_{2-pi}|} \arctg(f_{тр}) \right)},$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения в зацеплении колесо – рейка; $M_{кр2}$ – крутящий момент на зубчатом колесе; α_{2-p} – угол давления в зацеплении колесо – рейка; ξ_{2i} – угол между неподвижной системой координат, жестко связанной с центром колеса XO_2Y и подвижной системой координат $X_2O_2Y_2$, жестко связанной с зубом колеса.

Анализ результатов моделирования (рис.3) позволяет сделать вывод, что на большей части фазы зацепления усилие подачи убывает, а скорость перемещения комбайна возрастает (точка контакта смещается к нижней границе рабочего участка профилей).

Характер кривых меняется на последней четверти фазы зацепления (точка контакта смещается к верхней границе рабочего участка профилей), при этом пересопряжение сопровождается понижением скорости подачи и скачком усилия (возрастает). Минимум кривой усилия подачи совпадает с максимумом кривой скорости перемещения комбайна. В результате изнашивания за время эксплуатации коэффициенты неравномерности усилия и скорости подачи контактирующих профилей зубьев шестерни, зубчатого колеса и зубьев (цевок) рейки существенно повышаются.

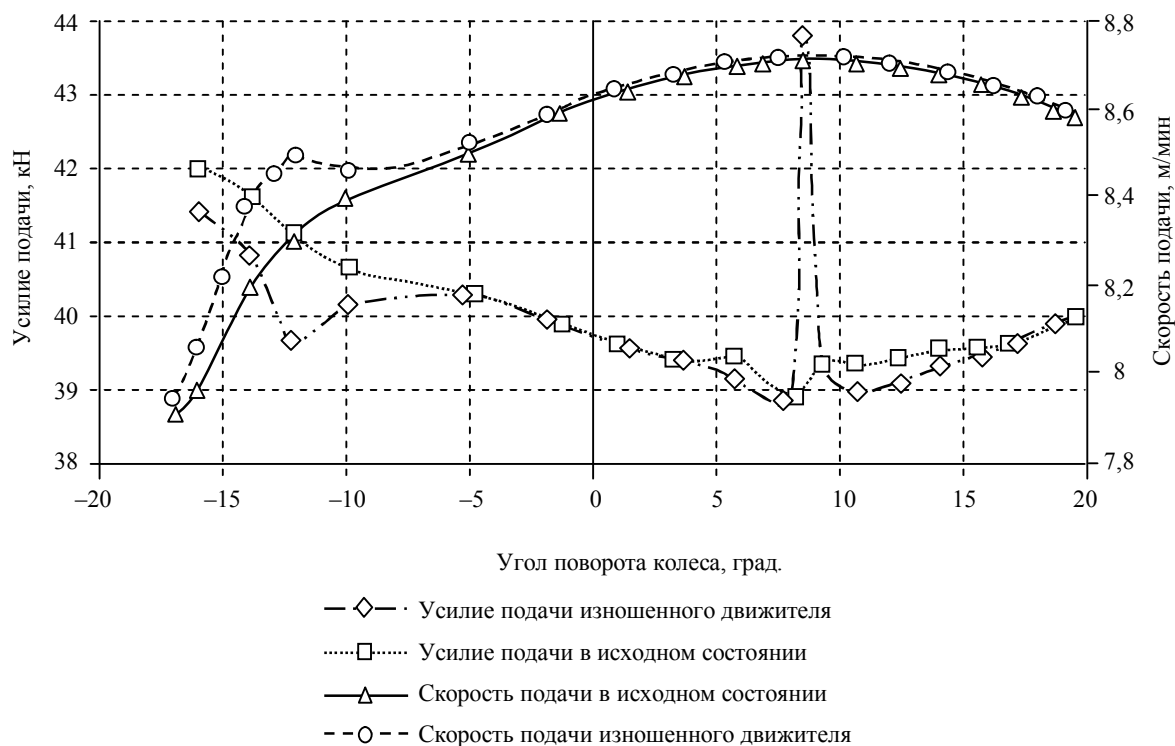


Рис.3. Изменение усилия подачи и скорости подачи в исходном и изношенном состоянии для двухэлементного движителя с зубчатой рейкой

При этом в двухэлементных движителях увеличение колебаний усилия подачи за фазу зацепления с износом профилей настолько значительно, что на момент максимального суммарного линейного износа в паре (6 мм) указанная характеристика возрастает почти в 2 раза относительно первоначального (исходного) уровня. Таким образом, в качестве критерия предельного состояния такого типа движителей следует рекомендовать коэффициент неравномерности усилия подачи, не допуская более чем двукратное его превышение в сравнении с доэксплуатационными показателями, либо, как минимум, контролировать указанный параметр наряду с контролем величины износа контактирующих профилей. Зубчато-реечный движитель должен проектироваться с двукратным запасом изгибной прочности изношенных зубьев колеса и рейки (износ 3 мм на сторону) по номинальным нагрузкам.

В трехэлементном движителе изменение силовых и кинематических характеристик в результате износа контактирующих профилей не столь значительно. Поэтому для такого типа движителей в качестве критерия предельного состояния следует рекомендовать величину максимального суммарного линейного износа профилей. При этом следует контролировать значения коэффициента неравномерности скорости подачи, не допуская его двукратного превышения относительно доэксплуатационных показателей. Необходимо проектировать движитель с учетом соблюдения требуемой изгибной прочности изношенных зубьев шестерни, зубчатого колеса и рейки (износ 3 мм на сторону) по максимально возможной нагрузке. В работе показано [7], что на изнашивание движителей существенное влияние оказывают также неравномерность силовых и кинематических характеристик привода, механические свойства материалов и горно-технологические условия эксплуатации. На основе аналитических исследований установлено, что ресурс движителей с зубчатой рейкой в среднем в 1,5 раза выше ресурса движителей с цевочным реечным ставом, что хорошо подтверждается накопленным опытом многолетней эксплуатации.

Проведенный с применением ПЭВМ на основе метода конечных элементов анализ прочностных характеристик тяговых органов (рис.4) позволил установить характер распределения напряжений в контактирующих элементах.

При проведении исследований было принято, что к рейке приложено тяговое усилие (80-250 кН) от взаимодействия с колесом движителя, равномерно распределенное по контактной образующей цевки. Моделирование опор осуществлено жестким закреплением по крепежным отверстиям. В качестве конечных элементов приняты четырехузловые тетраэдры со стороной 5 мм. Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что наи-

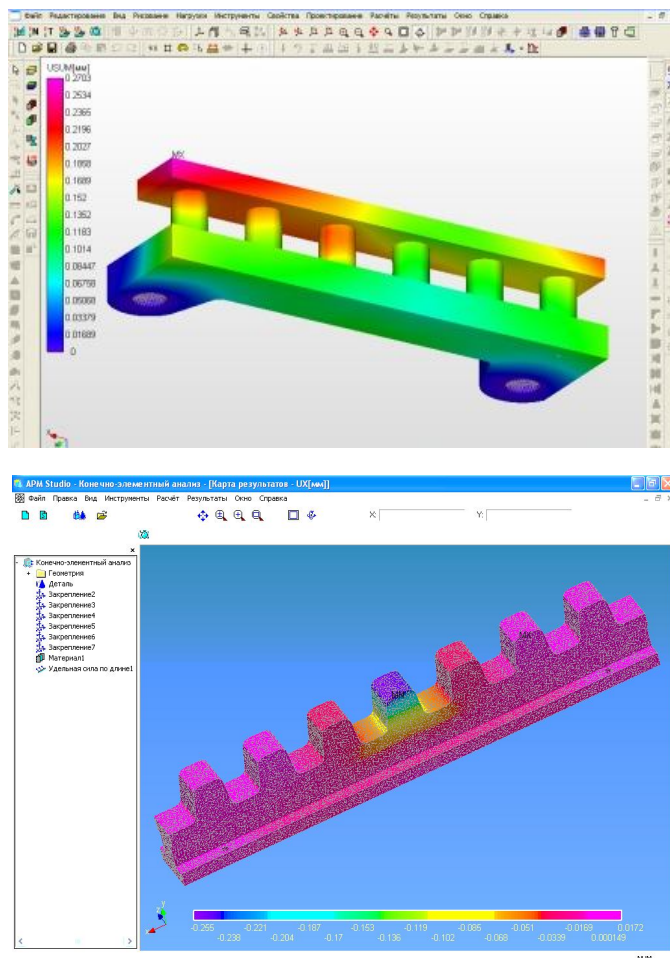


Рис.4. Анализ напряженно-деформированного состояния тяговых реек

более нагруженными элементами реек являются зуб, к которому приложена контактная нагрузка, а также два соседних зуба.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании зубчато-реечных движителей тяжело нагруженных горно-технологических машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесцепные системы подачи очистных комбайнов / Ю.Н.Семенов, В.Г.Лукиенко, Б.М.Геллер и др. М.: Недра, 1988. 152 с.
2. *Бойко Н.Г.* Динамика очистных комбайнов / ДонНТУ. Донецк, 2004. 206 с.
3. *Гавриленко В.А.* Основы теории эвольвентной зубчатой передачи. М.: Машиностроение, 1969. 431 с.
4. *Кондрахин В.П.* Электрические механизмы перемещения очистных комбайнов / В.П.Кондрахин, В.В.Косарев, М.И.Стадник; ДонНТУ. Донецк, 2010. 257 с.
5. *Лукиенко Л.В.* Перспективы совершенствования тяговых органов бесцепных систем подачи / Л.В.Лукиенко, Л.М.Гельфанд, Т.Н.Андропова // Уголь. 1992. № 5. С.25-32.
6. Силовые зубчатые трансмиссии угольных комбайнов. Теория и проектирование / П.Г.Сидоров, С.В.Козлов, В.А.Крюков, Л.П.Полосатов. М.: Машиностроение, 1995. 296 с.
7. Стационарные и тормозные режимы работы бесцепных систем перемещения очистных комбайнов / В.А.Бреннер, К.А.Головин, Т.В.Ковалева, Л.В.Лукиенко, А.Е.Пушкарев. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 220 с.

REFERENCES

1. *Semenov Yu.N., Lukienko V.G., Geller B.M.* et al. Bestsepnnye sistemy podachi ochistnykh kombainov (*Chainless haulage systems of shearer loaders*). Moscow: Nedra, 1988, p.152.
2. *Boiko N.G.* Dinamika ochistnykh kombainov (*Dynamics of shearer loaders*). DonNTU. Donetsk, 2004, p.206.
3. *Gavrilenko V.A.* Osnovy teorii evol'ventnoi zubchatoi peredachi (*Foundations of the theory of an involute gearing*). Moscow: Mashinostroenie, 1969, p.431.
4. *Kondrakhin V.P., Kosarev V.V., Stadnik M.I.* Elektricheskie mekhanizmy peremeshcheniya ochistnykh kombainov (*Electric haulage mechanisms of shearer loaders*). DonNTU. Donetsk, 2010, p.257.
5. *Lukienko L.V., Gelfand L.M., Andropova T.N.* Perspektivy sovershenstvovaniya tyagovykh organov bestsepnnykh sistem podachi (*Prospects of developing traction units of chainless haulage systems*). Ugol'. 1992. N 5, p.25-32.
6. *Sidorov P.G., Kozlov S.V., Kryukov V.A., Polosatov L.P.* Silovye zubchatye transmissii ugol'nykh kombainov. Teoriya i proektirovanie (*Power gear transmissions of shearer loaders. Theory and design*). Moscow: Mashinostroenie, 1995, p.296.
7. *Brenner V.A., Golovin K.A., Kovaleva T.V., Lukienko L.V., Pushkarev A.E.* Statsionarnye i tormoznye rezhimy raboty bestsepnnykh sistem peremeshcheniya ochistnykh kombainov (*Stationary and brake operating modes chainless haulage systems of shearer loaders*) Tula: Izd-vo TulGU, 2007, p.220.

JUSTIFICATION OF KINEMATIC AND POWER PARAMETERS OF RACK AND PINION GEAR FOR HEAVY-LOADED MINING MACHINES

L.V.LUKIENKO, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, lukienko_lv@mail.ru*

K.V.GAL'CHENKO, *Postgraduate student, lukienko_lv@mail.ru*

I.V.LITVINOV, *Postgraduate student, lukienko_lv@mail.ru*

Novomoskovsk Institute (branch) of Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russia

The article contains the research findings on the justification of kinematic and power parameters of a rack and pinion system for heavy-loaded mining machines. The article points out that for a designer to find more reasonable constructive solutions it is advisable to carry out wear assessment of the designed gear at a design stage. Application of additional quality parameters of gearing is proposed, i.e. coefficients of acceleration and sliding velocity and the scoring resistance coefficient. Introduction of these parameters will allow choosing geometrical parameters of the designed gearing, which will possess the best kinematic and power characteristics and will be least inclined to wear.

Key words: rack and pinion system, mining machine, wear, sliding acceleration coefficient, sliding velocity coefficient.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ В ПАРОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

А.Л.ЛЯШЕНКО, канд. техн. наук, доцент, *akuna_matata_kmv@mail.ru*

И.М.ПЕРШИН, д-р техн. наук, профессор, *ivmp@yandex.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

В статье рассмотрено устройство и принцип действия парогенераторной установки на примере активной зоны реактора РБМК-1000. Представлено описание оборудования, входящего в состав контуров многократной принудительной циркуляции (КМПЦ), образующих реактор. Подробно рассмотрен процесс регулирования расхода теплоносителя в технологическом канале реактора с помощью запорно-регулирующих клапанов (ЗРК) и обоснована необходимость автоматизации данного процесса.

Сформулирована и решена задача синтеза системы автоматического управления ЗРК. Рассмотрена возможность использования аппарата расширенных частотных характеристик (РЧХ) для частотного анализа систем с распределенными параметрами (СРП). Сформулирована и решена задача по разработке методики расчета настроек распределенного ПИД-регулятора. Разработано программное обеспечение для моделирования тепловых полей в активной зоне реактора.

Ключевые слова: парогенератор, системы с распределенными параметрами, расширенные частотные характеристики, расширенный пространственный годограф, передаточные функции распределенных объектов, показатель колебательности, системный анализ, управление.

Введение. В наше время большое распространение получили непрерывные технологические процессы большой мощности со сложными комплексами энергетических и материальных потоков. Практически все реальные объекты управления характеризуются определенной пространственной протяженностью и этим нельзя пренебречь, не рискуя потерять при этом качество. Состояние таких объектов зависит не только от времени (как обычно в сосредоточенных системах), они неразрывно связаны с пространственными координатами. К системам с распределенными параметрами относится широкий круг управляемых объектов. Это и традиционные технологии в самых различных областях техники, и новейшие технологии, которые часто не могут быть реализованы с требуемыми показателями без построения соответствующих систем управления. Поэтому возникает необходимость исследования, анализа и синтеза систем с распределенными параметрами.

Рассмотрим в качестве примера реактор РБМК-1000 Ленинградской АЭС как объект с распределенными параметрами.

Атомная электростанция представляет собой систему разнородных элементов оборудования со сложной схемой технологических связей. В такой системе осуществляются непрерывные взаимосвязанные процессы преобразования, передачи и перераспределения различных видов энергии, изменения параметров состояния и расходов рабочих тел и теплоносителей. Всякое изменение любого параметра или характеристики элемента оборудования в той или иной степени влияет на параметры, характеристики и показатели всей системы. Очень важно, что термодинамические и расходные параметры системы могут изменяться лишь в пределах физически возможных и технически осуществимых состояний энергоносителей и конструкций, а также в пределах технически допустимых эксплуатационных состояний материалов оборудования.

Для обеспечения безопасной эксплуатации АЭС проводится постоянная диагностика состояния реакторной установки. Для мониторинга параметров реактора АЭС предлагается рассматривать активную зону реактора как объект с распределенными параметрами. С помощью теории СРП могут быть качественно улучшены анализ и управление объектом, так как повышается точность при прогнозировании поведения, моделировании, расчете харак-

теристик рассматриваемой системы. Технологический процесс требует обеспечения управления температурными полями в активной зоне реактора, поэтому задача разработки методик синтеза распределенных регуляторов для систем управления объектами с распределенными параметрами и разработка систем автоматического управления запорно-регулирующими клапанами, которые в настоящий момент управляются вручную, становится все более актуальной.

Описание объекта и постановка задачи. Рассмотрим реакторную установку на примере РБМК-1000 (реактор большой мощности канальный) Ленинградской атомной электростанции. Реактор РБМК-1000 имеет две петли контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ), расположенные симметрично относительно осевой плоскости реактора.

Каждая петля включает два барабана-сепаратора и четыре циркуляционных насоса, прокачивающих воду через технологические каналы. При прохождении через активную зону вода нагревается до температуры кипения. В верхней части активной зоны образуется пар. Пароводяная смесь отводится в барабаны-сепараторы, где разделяется на воду, которая возвращается на вход реактора и сухой насыщенный пар (температура ~ 284 °С) под давлением 7 МПа, поступающий на два турбогенератора электрической мощностью 500 МВт. Отработанный пар конденсируется, после чего, пройдя через регенеративные подогреватели и деаэрактор, подается с помощью питательных насосов (ПЭН) в КМПЦ [1].

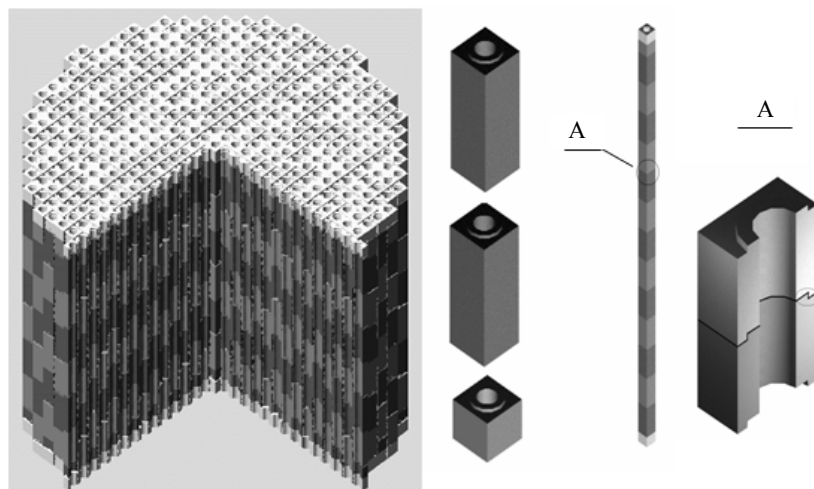
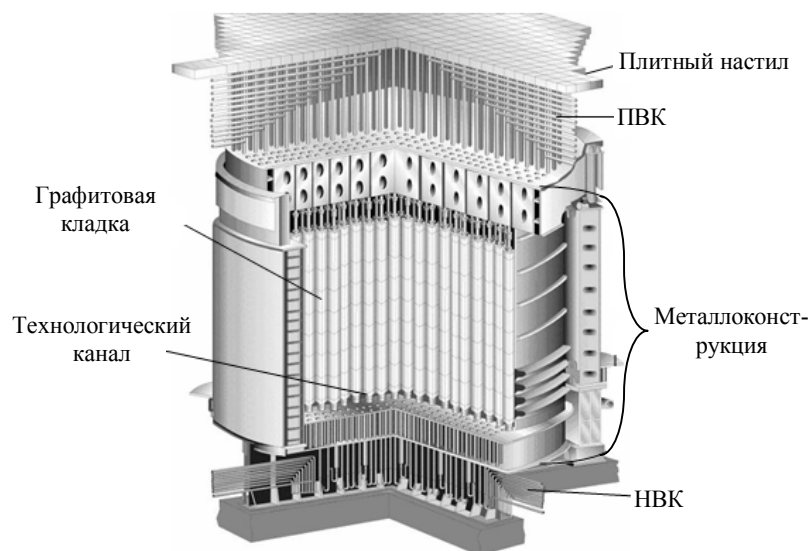


Рис. 1. Активная зона реактора и графитовая кладка

Данный реактор представляет собой систему, в которой в качестве замедлителя используется графит, в качестве теплоносителя – легкая вода, в качестве топлива – диоксид урана UO_2 с добавкой оксида эрбия Er_2O_3 . Активная зона РБМК представляет собой графитовую кладку цилиндрической формы, набранную из вертикальных графитовых колонн (рис.1). Внутри графитовых колонн имеются отверстия, через которые проходят технологические и специальные каналы [1].

В технологические каналы устанавливаются тепловыделяющие сборки (ТВС), состоящие из двух пучков ТВЭЛов. Геометрическое расположение графитовой кладки, которая вместе с топливными каналами образует активную зону, показано на рис.1.

Постоянное поддержание необходимого охлаждения активной зоны реактора РБМК – главная

задача безопасной эксплуатации. Подача теплоносителя в топливные каналы реактора для отвода тепла от тепловыделяющих сборок и от графитовой кладки осуществляется при помощи КМППЦ. На станциях с реакторами канального типа существует система регулирования расходов теплоносителя в технологических каналах реактора. Эта система представляет собой комплект устройств регулирования расхода в каждом технологическом канале (ТК) и предназначена для дистанционного регулирования расхода. Устройства регулирования состоят из запорно-регулирующего клапана (ЗРК), привода и указателя положения. ЗРК устанавливаются в помещении водяных коммуникаций на групповых раздаточных коллекторах на входе в трубопроводы водяных коммуникаций, по которым осуществляется подвод теплоносителя в каждый канал. С помощью привода запорно-регулируемый клапан соединяется с указателем положения, установленным на бетонном перекрытии пола помещения указателей положения клапанов, откуда специальным ключом осуществляется изменение степени открытия ЗРК.

Для измерения расхода воды в каналах реактора используются шариковые расходомеры типа Шторм-32М и Шторм-8М, установленные на трубопроводе подвода воды к каждому каналу. Для измерения температуры графитовой кладки применяются трехзонные и пятизонные блоки термопар, обеспечивающие измерение температуры графита в трех или пяти точках по высоте активной зоны. Термопреобразователи находятся в 17 температурных каналах, установленных в отверстиях в углах графитовых колонн кладки.

Основным условием теплотехнической надежности работы кипящего канального реактора РБМК является обеспечение бескризисной работы топливных каналов активной зоны. Мощность ТК и степень открытия ЗРК являются определяющими факторами, влияющими на расходы теплоносителя и запас до кризиса теплообмена в топливных каналах реактора. Критическая мощность ТК, при превышении которой может возникнуть кризис теплообмена, зависит от величины расхода воды через данный ТК, от давления и недогрева теплоносителя на входе ТК.

Если известна мощность каждого ТК-реактора, то для каждого ТК можно было бы установить степень открытия ЗРК так, чтобы расход соответствовал заданной величине коэффициента запаса до кризиса теплообмена. Однако система регулирования расхода через каналы реактора РБМК не предназначена работать в таком режиме. Регулирование расхода в ТК на мощности выполняется вручную. Операцию регулировки расхода воды в ТК производит оператор реакторного отделения. Управление запорно-регулирующим клапаном – довольно сложная и очень ответственная операция.

Регулирование расхода теплоносителя в технологическом канале реактора состоит из следующих основных этапов:

1) системой «Скала-микро» проводится автоматический периодический опрос всех каналов измерения расхода в ТК и сравнение результатов измерения с уставками снижения и повышения расхода воды (СРВ и ПРВ);

2) сигнализация отклонений за уставки СРВ и ПРВ выводится на мнемотабло каналов, установленное на блочном щите управления (БЩУ) в рабочей зоне оператора реактора;

3) ведущий инженер по управлению реактором (ВИУР) принимает решение и отдает распоряжение регулировки закрытия ЗРК оператору реакторного отделения;

4) оператор реакторного отделения вручную регулирует закрытие ЗРК.

Рассмотренный алгоритм реализован в системе управления ЗРК, структурная схема которой представлена на рис.2.

Предлагается автоматизировать процесс управления ЗРК и приводить его в действие с помощью шагового двигателя. Управление исполнительным механизмом необходимо осуществлять с помощью распределенного высокоточного регулятора (РВР). Установка распределенного высокоточного регулятора значительно повысит скорость отклика системы при возможных отклонениях: снижении или превышении расхода воды через активную зону реактора.

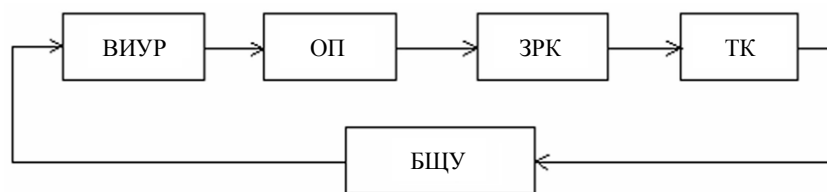


Рис.2. Структурная схема действующего управления ЗРК на АЭС

Разработка системы управления. Рассмотрим реактор атомной электростанции как систему с распределенными параметрами. Применим методы теории СРП для анализа процессов в активной зоне и синтеза систем управления этими процессами.

Системы с распределенными параметрами описываются не дифференциальными уравнениями обыкновенных производных (как системы с сосредоточенными параметрами), а более сложными математическими соотношениями. Это прежде всего дифференциальные уравнения в частных производных, интегродифференциальные, дифференциально-разностные уравнения, а также системы, включающие одновременно уравнения различной математической природы (например, уравнения электромагнитного поля и др.). Мониторинг параметров реакторной установки связан с необходимостью анализа непрерывных физических процессов, математическим описанием которых являются дифференциальные уравнения в частных производных вместе с краевыми условиями. Анализ течения жидкого теплоносителя (воды) проводится на основе уравнений Навье – Стокса.

Для решения поставленной задачи с помощью дифференциальных уравнений в частных производных была разработана математическая модель объекта управления. Одно из дифференциальных уравнений теплопроводности применительно к графитовой кладке [2] имеет вид

$$\frac{\partial T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial t} = a_{\Gamma} \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(x,y,z,t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a_{\Gamma} W_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma} V_{\Gamma}}, \quad (1)$$

где a_{Γ} – коэффициент температуропроводности графита; x, y, z – пространственные координаты; W_{Γ} – мощность, выделяемая при торможении нейтронов; λ_{Γ} – коэффициент теплопроводности графита; V_{Γ} – объем графитовой кладки.

Условия баланса массы, энергии и количества движения для однофазного течения в трубках технологического канала (зона подогрева) в результате преобразований можно приближенно записать в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial y} &= \frac{\partial \rho}{\partial t}, \\ \rho \frac{\partial h}{\partial t} + M \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{M}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} &= q'_d; \\ \frac{\partial M}{\partial t} + 2 \frac{M}{\rho} \frac{\partial M}{\partial y} - \frac{M^2}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho g \cos \beta + 10^3 \frac{\partial P}{\partial y} + f \frac{M^2}{\rho} &= 0, \end{aligned}$$

где $M(y, t) = \rho w$ – массовый расход, w – скорость движения жидкости; $\rho(y, t) = \rho(P, h)$ – плотность жидкости; $h(y, t)$ – энтальпия жидкости; $P(y, t)$ – давление; $q'_d = \pi d \alpha (\Theta - \vartheta)$ – внутренний тепловой поток на единицу длины трубки, передаваемый рабочему веществу, d – внутренний диаметр трубки; $\alpha(P, h, M, q)$ – коэффициент теплообмена; q – тепловой поток на единицу длины трубки, Θ – температура внутренней поверхности стенки трубки; $\vartheta(P, h)$ –

температура жидкости; g – ускорение свободного падения; β – угол между трубкой парогенератора и вертикалью; f – коэффициент потери давления.

Дифференциальные уравнения теплопроводности применительно к циркониевой трубе при $y_1 < y < y_2, R_2 < R < R_3$ имеют вид

$$\frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_{ц} \left[\frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p,f}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right], \quad (2)$$

где $a_{ц}$ – коэффициент теплопроводности циркония.

Разработанная система дифференциальных уравнений отражает общий характер процесса. Для получения полной математической модели объекта, соответствующей конкретной задаче, необходимо задание условий однозначности.

При моделировании рассматривались тепловые процессы, протекающие в графитовой кладке, состоящей из графитовых блоков. В технологическом канале располагается тепловыделяющая сборка, омываемая теплоносителем. Положения ЗРК будем рассматривать как функции входа, а контрольные точки во внутренних углах графитовых кладок как функции выхода. Эти точки выбраны не случайно. В реакторе в этих точках на стыках графитовых блоков расположены пятizonные термопары – датчики измерения температуры графита.

Для расчета тепловых полей было разработано специальное программное обеспечение. В качестве системы программирования был выбран язык C++ и среда для разработки C++ Builder (рис.3).

Результаты моделирования были проверены с помощью информационно-вычислительной системы «Скала-микро» Ленинградской атомной электростанции, обеспечивающей контроль над работой реактора, контроль и представление информации по энергоблоку, а также по системам защиты и управления.

На рис.4 представлен фрагмент видеокдра с демонстрацией температуры на входе в канал.

Значения, полученные путем моделирования, совпали с показаниями информационно-вычислительной системы «Скала-микро». Результаты моделирования показали, что переходные процессы обладают заданными показателями качества. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности разработанной математической модели.

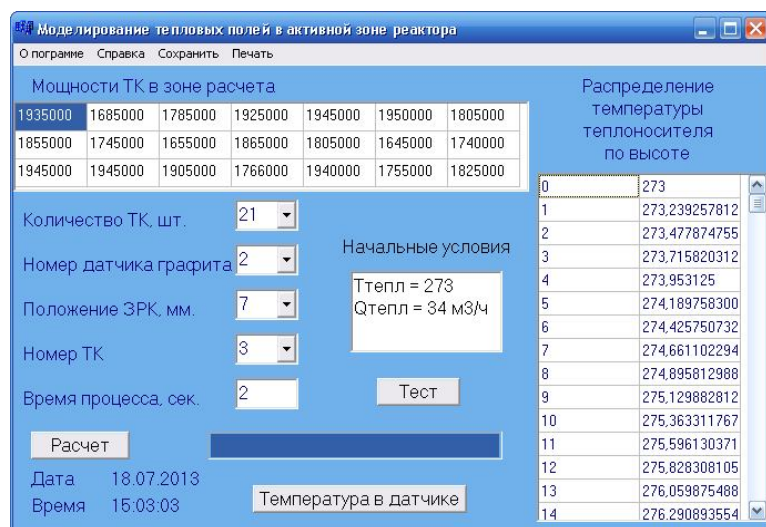


Рис.3. Окно программы

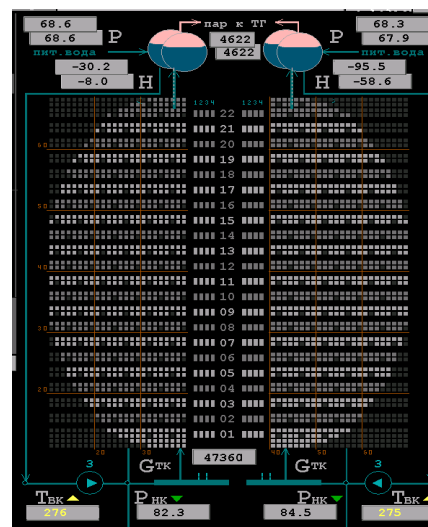


Рис.4. Фрагмент видеокдра

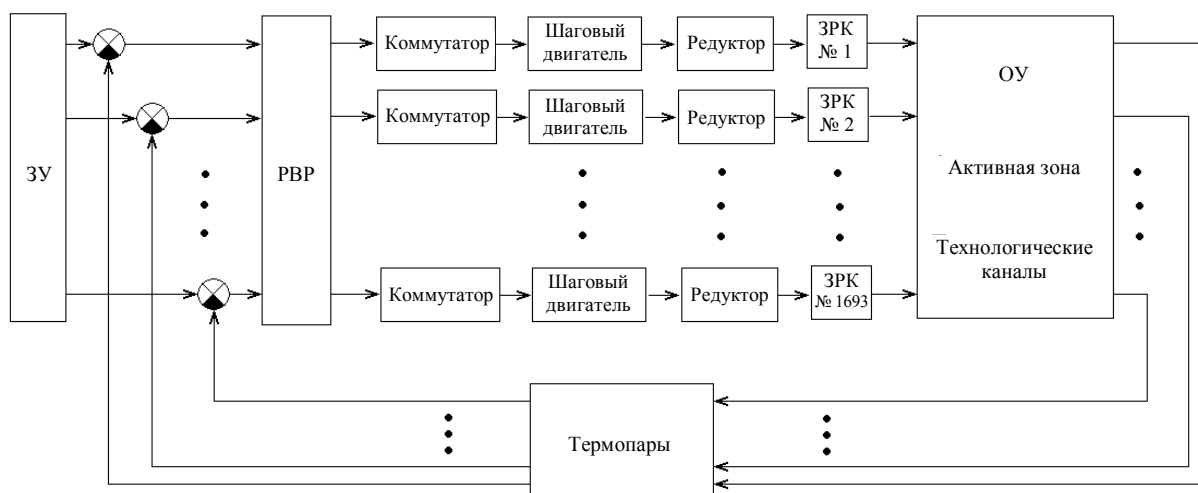


Рис.5. Структурная схема предложенного управления ЗРК

На рис.5 представлена структурная схема системы управления ЗРК с применением РВР.

Рассмотрим анализ технологических процессов с применением аппарата расширенных частотных характеристик, адаптированного для анализа распределенных систем управления.

Расширенными частотными характеристиками называются выражения для передаточной функции, для которых переменная p заменяется уравнением границы заданной колебательности. Для получения РЧХ следует заменить переменную p в передаточной функции уравнением границы заданной колебательности:

$$p = \omega(j - m), \quad 0 \leq \omega \leq \infty.$$

Анализ объекта управления. Исследования [4] показывают, что многие процессы могут быть аппроксимированы передаточными функциями по каждой η -й моде входного воздействия вида

$$W_{\eta}(p) = \frac{K_{\eta}}{T_{\eta}p + 1} e^{-\tau_{\eta}p}, \quad (3)$$

где p – оператор Лапласа, K_{η} , T_{η} , τ_{η} – параметры, определяемые с использованием результатов эксперимента.

Для проведения частотного анализа разложим входное воздействие $U(x, z, \tau)$ в ряд Фурье. Учитывая граничные условия, входное воздействие представим в виде

$$U(x, z, \tau) = L_3 + 0,1L_s \sin(\Psi_{\eta}x_i) \sin(\bar{\Psi}_{\gamma}z_j), \quad (4)$$

где $L_3 = 0,5(L_s)$; L_s – размер внутреннего диаметра трубы; L_3 – текущее положение заслонки;

$$\Psi_{\eta} = \pi \frac{\eta}{x_L}; \quad \bar{\Psi}_{\gamma} = \pi \frac{\gamma}{z_L}. \quad (5)$$

Реакцию объекта на каждую составляющую ряда (4) запишем в виде

$$T_{\eta,\gamma}(x, y, z, \tau) = H_{\eta,\gamma}(y, \tau) \sin(\Psi_{\eta}x) \sin(\bar{\Psi}_{\gamma}z). \quad (6)$$

Для двух пространственных мод входного воздействия ($\eta = 1, 3$) были проведены экспериментальные исследования и вычислены значения параметров:

$$K_1 = 1,0257; \quad T_1 = 0,7125; \quad \tau_1 = 0,1002;$$

$$K_3 = 1,0392; \quad T_3 = 0,6232; \quad \tau_3 = 0,1002.$$

Для частотного анализа объекта положим в (1) $p = \omega(j - m)$. При изменении значения ω от 0 до ∞ , а значения G от G_n до ∞ вектор $W(G, j\omega, m)$ в пространстве $\text{Re}(W)$, $\text{Im}(W)$, G опишет поверхность, которую назовем расширенным пространственным годографом (РПГ) (рис.6).

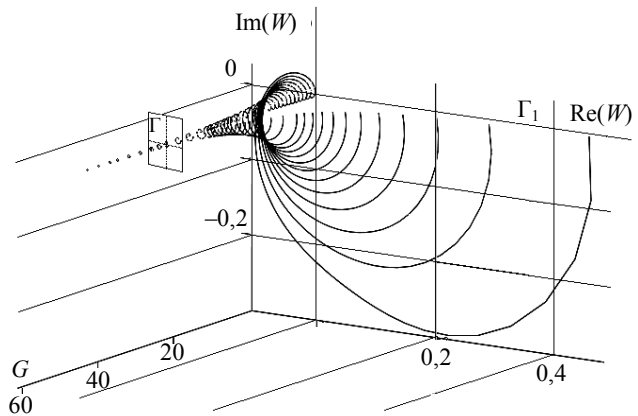


Рис.6. Расширенный пространственный годограф

Для определения частотной характеристики объекта, по заданной (η, γ, ξ) пространственной гармонической составляющей входного воздействия, необходимо расечь пространственный годограф плоскостью Γ , параллельной плоскости Γ_1 и проходящей через точку с координатами:

$$\text{Re}(W) = 0, \text{Im}(W) = 0, G = \tilde{G}(\eta, \gamma, \xi).$$

След пересечения плоскости Γ и пространственного годографа будет представлять искомую частотную характеристику [3].

Произведем построение расширенных логарифмических амплитудно-частотных характеристик (РЛАЧХ) и расширенных фазочастотных характеристик (РФЧХ) по $(\eta = 1,3)$ модам входного воздействия для исследуемого и рассмотренного выше объекта.

Полученные расширенные частотные характеристики используем для синтеза распределенного регулятора.

Синтез системы управления. Для системы управления объектом, передаточные функции которого по выбранным пространственным модам имеют вид (3), синтезирован распределенный ПИД-регулятор со следующими показателями: запас устойчивости по фазе $-\Delta\varphi \geq 0,5$; по модулю $-\Delta L \geq 10\text{db}$ значение параметров $\Delta = 0,7$.

Передаточная функция синтезируемого регулятора согласно [4] имеет вид

$$W(x, y, p) = E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \frac{1}{p} + E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] p, \quad (7)$$

где E_1, E_2, E_4 – коэффициенты усиления; ∇^2 – лапласиан; n_1, n_2, n_4 – весовые коэффициенты.

Для частотного анализа объекта положим в (3) $p = \omega(j - m)$ и определим модуль M_η и фазу φ_η :

$$M_\eta(m, \omega) = \frac{k_n}{\sqrt{(1 - T_n m \omega)^2 + T_n^2 \omega^2}} e^{m\tau\omega}, \quad (8)$$

$$\varphi_\eta(m, \omega) = -\omega\tau_\eta - \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{T_n m \omega - 1}{T_n \omega}\right). \quad (9)$$

Положим, что фазовый сдвиг, вносимый в систему регулятором, равен нулю. Тогда для определения частот среза модуля разомкнутой системы получим следующие выражения:

$$-\pi + \Delta\varphi_\eta = W(m, j\omega, \eta), \quad (10)$$

$$-\pi + \Delta\varphi_\eta = -\omega\tau_\eta - \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{T_n m \omega - 1}{T_n \omega}\right), \quad (11)$$

где $W(m, j\omega, \eta)$ – комплексный передаточный коэффициент объекта управления, определенный численным способом.

Подставляя значение T_η , τ_η и $\Delta\varphi_\eta = \pi/6$ в (11), определим значение частот среза модуля: $\eta = 1$, $\omega_1 = 1,13334$, $\eta = 3$, $\omega_1 = 1,13494$.

Используя полученные соотношения и значения частот среза модуля, проведем расчет настроек распределенного регулятора по методике, которая изложена в [4].

Запишем передаточную функцию распределенного ПИД-регулятора:

$$W(x, y, s) = 1,7572 \left[\frac{1827 \cdot 7125}{1828 \cdot 7125} - \frac{1}{1828 \cdot 7125} \nabla^2 \right] + 2,49812 \left[\frac{2855 \cdot 1728}{2856 \cdot 1728} - \frac{1}{2856 \cdot 1728} \nabla^2 \right] \frac{1}{s} + 0,0207s. \quad (12)$$

Заключение. При таком принципе управления расходом теплоносителя автоматизируется регулировка ЗРК, т.е. оперативный персонал проводит только контроль теплотехнических параметров и повышается скорость отклика системы при возможных отклонениях расхода воды через активную зону реактора. Регулирование и контроль расхода теплоносителя по каждому каналу позволит на выходе всех каналов получать одинаковые теплотехнические параметры и, соответственно, иметь минимально необходимый расход теплоносителя через реактор.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов М.А.* Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / М.А.Абрамов, В.И.Авдеев, Е.О.Адамов; Под общ. ред. Ю.М.Черкашова. ГУП НИКИЭТ. М., 2006. 632 с.
2. *Ляшенко А.Л.* Математическое моделирование системы с распределенными параметрами на примере активной зоны реактора РБМК-1000: Матералы 4-й Междунар. научн. конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» / А.Л.Ляшенко, С.Л.Морева. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. С.218-225.
3. *Ляшенко А.Л.* Частотный анализ объектов с распределенными параметрами с помощью расширенных частотных характеристик: Материалы 6-й научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ – 2010). СПб, 2010. С. 65-70.
4. *Першин И.М.* Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ, 2007. 244 с.

REFERENCES

1. *Abramov M.A., Avdeev V.I., Adamov E.O.* Kanal'nyj jadernyj jenergeticheskij reaktor RBMK (*Channel RBMK nuclear power reactor*). Ed. Ju.M.Cherkashova. GUP NIKIJeT. Moscow, 2006, p.632.
2. *Ljashenko A.L., Moreva S.L.* Matematicheskoe modelirovanie sistemy s raspredelennymi parametrami na primere aktivnoj zone reaktora RBMK-1000 (*Mathematical modeling of systems with distributed parameters by the example of the reactor core RBMK-1000*): Materaly 4-j Mezhdunar. nauchn. konferencii «Sistemnyj sintez i prikladnaja sinergetika»/ Taganrog: Izd-vo TTI JuFU, 2011, p.218-225.
3. *Ljashenko A.L.* Chastotnyj analiz ob'ektov s raspredelennymi parametrami s pomoshh'ju rasshirenyh chastotnyh harakteristik (*Frequency response analysis of objects with distributed parameters by means of expanded frequency characteristics*): Materialy 6-j nauchnoj konferencii «Upravlenie i informacionnye tehnologii» (UIT – 2010). St Petersburg, 2010, p.65-70.
4. *Pershin I.M.* Analiz i sintez sistem s raspredelennymi parametrami (*Analysis and synthesis of systems with distributed parameters*). Pjatigorsk: Reklamno-informacionnoe agentstvo na KMV, 2007, p.244.

DEVELOPMENT OF THE STEPPER MOTOR CONTROL SYSTEM IN STEAM GENERATING UNITS

A.L.LYASHENKO, *PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,*
akuna_matata_kmv@mail.ru

I.M.PERSHIN, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, ivmp@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article deals with the design and operation of a steam generating unit through the example of the reactor core RBMK-1000 (High Power Channel-type Reactor). It contains the description of the equipment being a part of the multiple forced circulation circuits (MFCC), which form the reactor. Careful consideration is given to the process of controlling the coolant flow in the reactor fuel channels via shut-off control valve (SOCV) and the necessity of its (the process) automation.

The problem of SOCV automatic control system synthesis is formulated and solved. The possibility of using a device with extended frequency response (EFR) for a frequency response analysis of distributed parameter systems (DPS) is considered. The problem of developing a method for calculating the settings of the distributed PID-controller is formulated and solved. Software for the simulation of thermal field in the reactor core is developed.

Key words: steam generator, distributed parameter systems, extended frequency response characteristics, extended spatial hodograph, transfer functions of distributed objects, oscillation index, system analysis, control.

НАВИГАЦИОННО-ВРЕМЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОДИНАМИЧНЫМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Д.А.ПЕРВУХИН, *д-р техн. наук, профессор, pervuchin@rambler.ru*

С.В.КОЛЕСНИЧЕНКО, *канд. техн. наук, доцент, serjkor@yandex.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Исследованы актуальные вопросы повышения точности применения высокودинамичных летательных аппаратов, используемых с целью разведки полезных ископаемых, мониторинга окружающей среды, обеспечения экологической и пожарной безопасности, а также решения других специальных задач. Рассмотрены возможные варианты построения систем управления высокودинамичными объектами на основе комплексирования традиционных инерциальных навигационных систем и аппаратуры потребителей сетевых спутниковых радионавигационных систем. Обоснованы некоторые схемные, технические и конструктивные решения по созданию перспективной навигационной аппаратуры летательных аппаратов.

Ключевые слова: высокودинамичные объекты, системы управления, альтернативные навигационные системы, комплексирование, навигационно-временное обеспечение, технический уровень, эффективность.

Введение. В настоящее время как отечественными, так и зарубежными разработчиками большое внимание уделяется вопросам развития и совершенствования систем управления высокودинамичными подвижными объектами. В первую очередь, это относится к исследованиям в области создания прецизионных гироскопических и оптико-механических систем управления с улучшенными характеристиками [1-12]. Разработка последних требует больших временных, экономических и интеллектуальных затрат, что трудно осуществить практически, учитывая реальное положение в российской экономике вообще и в отраслях оборонной промышленности в частности. Как следствие, при разработке перспективных навигационных систем все большее внимание уделяется новым способам уменьшения ошибок управления на основе комплексирования традиционных инерциальных навигационных систем с системами навигации, основанными на других физических принципах. Так, в связи с успешным применением существующих сетевых спутниковых радионавигационных систем (СРНС) и широким развитием их аппаратуры потребителей имеется реальная возможность создания альтернативных высокоточных навигационных систем высокودинамичных подвижных объектов и летательных аппаратов (ЛА).

Анализ состояния и основных направлений развития систем управления высокودинамичными подвижными объектами. Достижения в области микроэлектроники, вычислительной техники и в разработке датчиков систем автономной навигации, построенных на принципах, отличных от классических гироскопов, позволили по-новому взглянуть на проблему совершенствования систем автономной навигации.

Улучшение характеристик систем автономной навигации высокودинамичных подвижных объектов (ВДО) долгие годы осуществлялось по сходным принципам и направлениям. Экономические трудности, жесткие требования к эксплуатационным характеристикам, ограниченные сроки разработки и внедрения привели к значительному сокращению работ в области традиционных технологий. В первую очередь, это относится к исследованиям в области создания прецизионных гироскопических и оптико-механических систем с улучшенными характеристиками. Разработка и производство последних требует больших временных, экономических и интеллектуальных затрат. Как следствие, все большее внимание уделяется новым способам повышения эффективности систем управления ВДО.

Одним из наиболее перспективных направлений улучшения характеристик систем автономной навигации является применение комплексированных (интегрированных) навигационных систем, в которых совместно обрабатываются сигналы инерциальной навигационной системы (ИНС) и наземной аппаратуры потребителя (АП) спутниковой радионавигационной системы [3, 13].

Характерной чертой СРНС является избыточность навигационной информации. Такие системы позволяют сохранить достоинства и снизить влияние недостатков ИНС и навигационной АП [3]. Повышение эффективности СРНС обусловлено тем, что ИНС и АП СРНС взаимно дополняют друг друга (табл.1).

Таблица 1

Характеристики инерциальных и спутниковых радионавигационных систем

Характеристика	ИНС	СРНС
Автономность	Да	Нет
Необходимость начальной выставки и калибровки	Да	Нет
Характер ошибок	Малый уровень шумовой составляющей, нестационарный процесс	Относительно высокий уровень шумов, стационарный процесс
Возможность отсутствия навигационных определений	Нет	Да
Темп выдачи навигационных данных	Высокий (10-1000 Гц)	Низкий (1-10 Гц)
Возможность резервирования	Эффективно	Неэффективно

В системах управления высокодинамичными летательными аппаратами все чаще применяются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Они, в отличие от классических ИНС, построенных на базе гироскопов на шарикоподшипниковом подвесе, поплавковых гироскопах или динамически настраиваемых гироскопах, лишены ряда недостатков при сохранении большего числа преимуществ (табл.2).

Таблица 2

Сравнительная характеристика аппаратуры инерциальных и бесплатформенных инерциальных навигационных систем в баллах

Характеристика	ИНС	ИНС на динамически настраиваемых гироскопах	БИНС
Обеспечение требуемой точности	3	3	2
Простота конструкции	1	1	3
Низкая чувствительность к перегрузкам	1	2	3
Относительно низкое потребление энергии	1	2	3
Малое время запуска	1	2	3
Отсутствие «пространственной памяти»	1	1	3
Возможность ввода управляющего или корректирующего сигнала	1	2	3
Относительно низкая стоимость производства	1	2	3
Требовательность к составу пусковой аппаратуры	3	3	2

Примечание. 1 – характеристика обеспечивается в низкой степени или не обеспечивается; 2 – обеспечивается в достаточной степени; 3 – обеспечивается в максимальной степени.

В качестве чувствительных элементов БИНС могут быть использованы вибрационные гироскопы, лазерные гироскопы и волоконно-оптические гироскопы. Диапазон остаточных скоростей указанных гироскопов составляет 10^{-6} - 10^2 угловых градусов в час. Наибольшее применение в качестве датчиков БИНС нашли лазерные гироскопы, волоконно-оптические гироскопы и микромеханические гироскопы и акселерометры [4-6, 11].

Основной сложностью при разработке БИНС является быстрое накопление ошибки измерения навигационных параметров, поскольку из-за жесткой связи датчиков с корпусом ВДО

появляются различного рода вибрации и шумы. Как следствие, возникает необходимость периодической коррекции БИНС по данным внешних приборов. Это стало еще одной из предпосылок к разработке СРНС.

Суть комплексной обработки информации заключается в построении таких алгоритмов, с помощью которых обеспечивается максимальная точность определения основных навигационных параметров: координат, скорости и углов ориентации. Качество алгоритмов определяется их структурой, характером ошибок навигационных систем, степенью адекватности моделей ошибок физической реальности, а структура – критериями оптимальности и в конечном счете уровнем знаний об условиях функционирования навигационных систем, характере возмущающих воздействий и ошибок измерений, степени разработанности математического аппарата решения задач оптимизации.

Анализ литературы [1-8, 11-16] показал, что существует большое количество подходов как к построению алгоритмов комплексной обработки в комплексированных системах управления (КСУ), так и к их классификации в зависимости от того, каким образом распределяется вся имеющаяся измерительная информация и на каком уровне реализуется обработка. Однако, несмотря на многообразие существующих алгоритмов, для использования в системах управления ВДО подходит очень небольшое их количество. Классификация таких алгоритмов может осуществляться по трем основным признакам:

- по виду учета динамики объекта – инвариантные и неинвариантные;
- по правилам формирования вектора состояния и разностных измерений – слабосвязанные, сильносвязанные и глубокоинтегрированные;
- по виду навигационного фильтра – Калмана, Винера, минимаксные и рестрективные.

Наиболее хорошо разработанный математический аппарат решения задач комплексной обработки навигационной информации (задач фильтрации навигационных параметров) по данным навигационных наблюдений имеют алгоритмы калмановской фильтрации (табл.3) [2, 11-16].

Таблица 3

Сравнительная характеристика схем комплексирования

Тип комплексирования	Основные особенности
1. Разомкнутый	Ограниченность ошибок оценок местоположения и скорости, наличие информации об ориентации и угловой скорости, минимальные изменения в бортовой аппаратуре
2. Слабосвязанный	Все перечисленные качества разомкнутой схемы, выставка и калибровка ИНС в полете
3. Тесносвязанный	Все перечисленные качества слабосвязанной схемы, повышение помехоустойчивости
4. Глубокоинтегрированный	Обеспечение характеристик точности и помехозащищенности, близких к потенциальным. Требуется существенной перестройки АП СРНС и высоких вычислительных затрат

Первые три из приведенных в таблице типов комплексирования ИНС и АП могут быть реализованы с использованием существующих моделей АП, ИНС и навигационных процессоров. Однако следует отметить, что для более полного использования открывающихся возможностей интеграции АП и ИНС целесообразно создать специализированные датчики для инерциальной и спутниковых систем. Последняя из рассмотренных схем (глубокоинтегрированная) обязательно требует разработки единого приемоизмерительного инерциально-спутникового модуля [4].

В слабо- и тесносвязанных, а также в глубокоинтегрированной схемах комплексирования итоговая оценка ошибок навигационных параметров может быть использована в АП СРНС в режиме допоиска сигналов навигационных систем для сокращения области поиска по задержке и доплеровскому смещению частоты.

Реализация вышеуказанных алгоритмов (особенно тесносвязанного) требует больших вычислительных мощностей, что, наряду с необходимостью реализации собственных алгоритмов БИНС и алгоритмов терминального управления движением центра масс, предъявляет серьезные требования к вычислительным мощностям бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ).

В связи с широким использованием при определении навигационных параметров БЦВМ применение классических схем комплексирования нецелесообразно, так как преимущества каждой из этих схем зависят от типа навигационного параметра, конкретной конструкции ИНС и АП, характеристик процессора и т.д.

Более целесообразной является программная реализация этих схем в виде навигационного фильтра, позволяющего изменять тип входных и выходных сигналов в зависимости от типа, конструкции и параметров подсистем, входящих в блок навигационных алгоритмов. Однако данное техническое решение требует решения ряда вспомогательных задач:

- рационального взаимодействия входящих в состав КСУ подсистем на всех этапах функционирования ВДО;
- «маневрирования» вычислительными ресурсами БЦВМ;
- оптимального распределения операций, маневров и времени их совершения.

Задача выбора оптимального алгоритма комплексной обработки навигационных сигналов, рационального распределения вычислительных мощностей может решаться непосредственно в БЦВМ. Исходные данные для принятия таких решений могут быть представлены в виде некоторого вектора исходных состояний, компоненты которого будут определяться рядом факторов, к которым в первом приближении следует отнести:

- 1) тип траектории;
- 2) закон управления (программный, терминальный);
- 3) фоноцелевую обстановку (положение точки старта, дальность действия, тип объекта воздействия и др.);
- 4) техническое состояние как отдельных подсистем КСУ, так и систем и блоков объекта управления в целом.

На основании оценки вектора исходного состояния в БЦВМ могут быть выработаны решения:

- 1) о возможности или невозможности «горячего старта»;
- 2) о выборе алгоритма комплексной обработки навигационных параметров;
- 3) о назначении приоритета навигационных данных определенного источника;
- 4) о выделении вычислительных ресурсов различным навигационным алгоритмам на всех этапах функционирования.

Формирование теоретических положений построения систем навигационно-временного обеспечения комплексированных систем управления высокодинамичными подвижными объектами. Проведенный анализ состояния и развития автономных систем управления указывает на объективную необходимость совершенствования теории разработки перспективных систем навигации и управления подвижными объектами на основе применения альтернативных навигационных систем. В качестве одного из возможных подходов реализации указанного направления приведено формирование теоретических положений (аспектов) систем навигационно-временного обеспечения (НВО) комплексированных систем управления высокодинамичными подвижными объектами.

Как и любая теория, теоретические положения НВО КСУ высокодинамичными подвижными объектами обладают рядом функций, наиболее значимыми из которых являются следующие:

- методологическая функция (обеспечивает концептуальными структурами, терминологией и понятийным аппаратом);
- объяснительная функция (обобщение опыта развития исследуемых систем, выявление причинных и иных зависимостей, многообразия связей, существенных характеристик, законов происхождения и развития и т.п.);
- синтетическая функция (объединение отдельных достоверных знаний, подходов, методов, способов в целостную систему);
- предсказательная (практическая) функция (позволяет понимать, объяснять или прогнозировать различные проявления объекта теории).

Чтобы реализовывать указанные функции, теоретические положения НВО КСУ высокодинамичными подвижными объектами должны представлять собой совокупность концептуальных, методологических и методических положений.

Теоретические положения НВО КСУ высокодинамичными подвижными объектами являются частью классической теории автономных систем управления и предназначены для повышения технического уровня систем управления. Основная цель разрабатываемых теоретических положений заключается в обобщении и систематизации знаний о комплексированных системах управления высокодинамичными подвижными объектами, системах их обеспечения в удобной для практического применения и дальнейшего развития форме.

Для достижения данной цели теоретические аспекты НВО КСУ высокодинамичными подвижными объектами должны реализовывать возможность наиболее полного отображения объективных свойств реального процесса функционирования систем навигации (классических автономных систем управления и альтернативных навигационных систем), являться основой для всестороннего анализа и обобщения бортовых систем управления и систем, их обеспечивающих, а также быть достаточно простыми для практического применения.

Построение КСУ высокодинамичными подвижными объектами представляет собой процесс последовательного выполнения ряда этапов. Основными этапами построения КСУ ВДО являются следующие [4-6]:

- анализ и оценка существующих систем управления ВДО;
- выработка подхода к построению КСУ ВДО;
- внедрение КСУ ВДО;
- совершенствование КСУ ВДО.

В результате выполнения этапа анализа и оценки существующих систем управления ВДО определено их современное состояние, исследованы основные схемные и технические решения построения бортовой аппаратуры, выявлены основные проблемы, снижающие эффективность их использования. Кроме того, детально рассмотрены вопросы, касающиеся рассеивания и его основных составляющих.

Выполнение этапа выработки подхода к построению КСУ ВДО включает:

- формирование концептуальных основ построения КСУ ВДО;
- определение принципов построения и функционирования КСУ ВДО;
- выработку и обоснование способов реализации методологических положений базовых наук по обеспечению построения КСУ ВДО.

На этапе внедрения КСУ ВДО осуществляется оценка корректности функционирования систем, получаемого эффекта от их схемной, технической и технологической реализации, а также выработка практических рекомендаций по разработке и внедрению.

Этап совершенствования КСУ ВДО заключается в определении направлений дальнейших исследований, позволяющих достичь максимальной эффективности использования систем данного класса.

На основании результатов исследований [4-6] определено, что концептуальные основы построения КСУ ВДО представляют обобщенную систему взглядов и принципов, на основе которых формируется некоторая стандартная форма подхода к проблеме – парадигма теоретических положений построения данных систем.

Проведенный технический анализ условий применения высокодинамичных подвижных объектов, систем управления ВДО, научно-методических подходов формирования точности аппаратуры систем управления, а также анализ ряда источников по основам, построению и применению научно-теоретического аппарата [4-6] позволяет выделить следующие основные составляющие концептуальных основ теории построения систем НВО КСУ высокодинамичными подвижными объектами:

- выявление противоречий в процессах развития и совершенствования систем управления образцов ВДО, их информационного и топогеодезического обеспечения;
- исследование причинно-следственных связей процессов формирования точности на этапах предстартовой подготовки и полета ВДО, описание закономерностей процессов управления;
- формирование понятийного аппарата теории построения КСУ ВДО;
- описание принципов построения КСУ ВДО;
- разработка методического аппарата обоснования точности КСУ ВДО;

- обоснование направлений формирования технического облика КСУ ВДО, а также систем (подсистем) их обеспечения и взаимодействия;

- разработка методического аппарата оценки эффективности функционирования КСУ ВДО.

Более детально и комплексно охватить указанные вопросы и приоритетные направления их решения можно в ходе разработки навигационно-временного обеспечения КСУ летательных аппаратов. Структура и основные составляющие НВО представлены на рис.1.

Анализ ряда источников [1-6] свидетельствует, что наличие множества отдельных частных решений в области навигационно-временного обеспечения подвижных высокоманевренных объектов не снимает задачу глубокой комплексной проработки соответствующих вопросов, исходя из концепции развития интеллектуальных систем управления, накопленного инженерно-конструкторского опыта, а также с учетом реального состояния промышленности РФ.

Применительно к высокодинамичным подвижным объектам навигационно-временное обеспечение представляет собой комплекс мероприятий, направленных на получение потребителем данных навигационной информации, а также необходимых данных о пространственно-временных состояниях и отношениях объектов и процессов, используемых или учитываемых им при решении навигационно-временных задач. Кроме того, система навигационно-временного обеспечения представляет собой совокупность аппаратных средств, средств программно-математического обеспечения и баз данных, необходимых для реализации операций и решения задач навигационно-временного обеспечения.

Основными составляющими системы навигационно-временного обеспечения КСУ ВДО являются следующие:

- системы (комплексы и устройства), формирующие навигационное поле;
- приемная аппаратура наземных и бортовых систем управления;
- модели и методы оптимальной обработки навигационной информации.

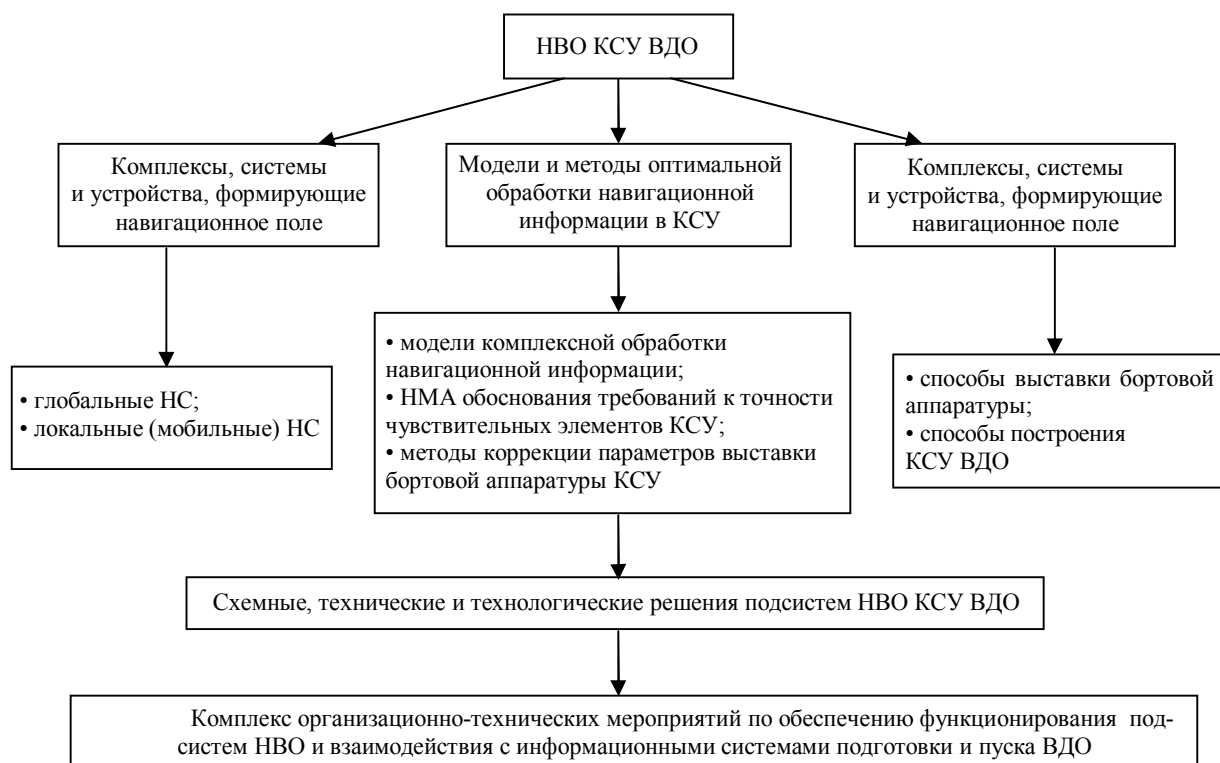


Рис.1. Структура, основные элементы и функциональные связи системы НВО КСУ высокодинамичными подвижными объектами

НМА – научно-методический аппарат; НС – навигационные системы

Основные составляющие, определяющие приоритетные задачи и направления развития НВО применительно к разработке и функционированию комплексированных систем управления ВДО, следующие:

- оценка возможностей существующих и перспективных систем, создающих навигационное поле;
- оценка возможностей и обоснование требований приемной аппаратуры потребителей (альтернативных навигационных систем);
- исследование существующих и перспективных методов управления и наведения (высокоскоростных высокоманевренных летательных аппаратов);
- исследование проблем структурной и функциональной реконфигурации бортовых систем управления;
- разработка новых и развитие существующих методов обработки параметров навигационной информации;
- обоснование схемных, технических, технологических и конструктивных решений систем и методов управления (наведения) ВДО, а также их отдельных элементов.

Таким образом, теоретические аспекты построения систем навигационно-временного обеспечения комплексированных систем управления высокодинамичными подвижными объектами – это совокупность идей, концепций, принципов и методик, направленных на достижение качественного функционирования систем управления в условиях значительных изменений координатно-временного и навигационного обеспечения.

Практическая реализация рассмотренных положений навигационно-временного обеспечения при проектировании комплексированных систем управления перспективными высокодинамичными объектами позволит:

- значительно расширить диапазон возможного применения систем абсолютной и относительной навигации (например, при технической реализации полигонного и испытательного оборудования высокодинамичных высокоманевренных летательных аппаратов);
- сократить время начальной выставки приборов систем управления на 25-40 %;
- повысить надежность процессов навигационных определений;
- повысить скрытность процессов обработки информации бортовыми навигационными системами;
- в режиме реального времени осуществлять коррекцию начальных условий местоположения и последующего наведения высокодинамичных объектов;
- повысить в целом качество обеспечения процессов функционирования систем управления при минимизации ошибок наведения в изменяющихся условиях реального времени.

Обоснование способов аналитической выставки бортовой аппаратуры систем управления летательными аппаратами. В качестве одного из возможных подходов к решению задач повышения точности, сокращения времени операций предстартовой подготовки, а также коррекции автономных инерциальных навигационных систем ЛА предлагается применить способ аналитической выставки бортовой аппаратуры. Сущность данного способа заключается в использовании радиосигналов навигационных космических аппаратов (КА) при определении местоположения ЛА, а также для последующей выставки и коррекции бортовой аппаратуры системы управления.

Как показал анализ технических характеристик приемной аппаратуры потребителей СРНС, в настоящее время возможно высокоточное определение координат местоположения объекта с помощью сигналов космических аппаратов [1-6, 13-15]. Далее, при известных координатах цели, решением обратной геодезической задачи вычисляется угол прицеливания ЛА, для передачи которого на борт необходим гирокомпас и ряд оптических приборов. Следовательно, основная трудность при выставке бортовой аппаратуры по направлению состоит в технической реализации процесса определения азимутов и других ориентирных направлений, а также передача их в бортовую аппаратуру ЛА.

Эту трудность можно преодолеть, если использовать сигналы СРНС для точного нахождения местоположения, ориентации в пространстве и азимутального наведения ЛА на цель. При

этом сделаем допущение о том, что в состав ЛА должна входить бортовая радиолокационная станция (БРЛС), которая в последующем может быть использована при решении задач коррекции параметров траектории полета ЛА и идентификации объектов поиска [9].

В качестве измеряемых в БРЛС радионавигационных параметров используется время прихода радиосигналов и доплеровский сдвиг частоты. Данным навигационных параметров соответствует дальность между КА и ЛА, а также радиальная скорость их относительного движения.

Время прихода сигналов определяется по шкалам времени БРЛС и зависит от момента излучения сигнала КА относительно шкалы времени СРНС, а также взаимного сдвига шкал времени БРЛС и СРНС и задержки распространения сигналов. Измерение времени прихода сигналов с i -го КА эквивалентно измерению квазидальности:

$$R_{квi} = R_{0i} + c\Delta t_{pi} + c(\Delta t - \Delta t_{КАi}), \quad (1)$$

где R_{0i} – истинная наклонная дальность от БРЛС до i -го КА; c – скорость распространения радиоволн; Δt_{pi} – приращение задержки времени за счет влияния атмосферы (тропосферы и ионосферы); Δt – расхождение шкалы времени БРЛС относительно шкалы времени СРНС; $\Delta t_{КАi}$ – расхождение шкалы времени i -го КА относительно шкалы времени СРНС.

Истинная наклонная дальность от БРЛС до i -го КА определяется их взаимным положением в пространстве:

$$R_{0i} = \sqrt{(X_{КАi} - X)^2 + (Y_{КАi} - Y)^2 + (Z_{КАi} - Z)^2}, \quad (2)$$

где $X_{КАi}$, $Y_{КАi}$, $Z_{КАi}$ – координаты i -го КА в геоцентрической прямоугольной системе координат; X , Y , Z – координаты БРЛС в той же системе отсчета.

Координаты $X_{КАi}$, $Y_{КАi}$, $Z_{КАi}$ и расхождение шкалы времени i -го КА относительно шкалы времени СРНС ($\Delta t_{КАi}$) передаются с борта КА. Из выражений (1) и (2) следует, что измеренное значение квазидальности $R_{квi}$ является функцией четырех неизвестных – X , Y , Z и Δt .

Измерения квазидальности по радиосигналам четырех КА позволяют составить систему из четырех уравнений относительно указанных неизвестных и тем самым решить навигационно-временную задачу, в результате которой рассчитываются координаты БРЛС, а следовательно, и ЛА.

Для определения угловой ориентации ЛА (осей чувствительности приборов системы управления) рассмотрим следующие варианты реализации способа аналитической выставки.

Вариант 1. Ориентация приборов бортовой аппаратуры систем управления на основе метода пеленгационных измерений.

Ориентация ЛА заключается в определении угла прицеливания $\alpha_{пр}$, представляющего собой горизонтальный угол между геометрическим центром антенного блока и направлением на цель, и прицеливании приборов:

$$\alpha_{прi} = \alpha_{ц} + \beta_{измi} - \alpha_{КА},$$

где $\alpha_{ц}$ – дирекционный угол цели (определяется решением обратной геодезической задачи по рассчитанным координатам точки пуска и известным координатам цели); $\beta_{измi}$ – горизонтальный угол между работающим излучателем и геометрическим центром антенного блока; $\alpha_{КА}$ – дирекционный угол КА, от которого производится прием радионавигационных параметров (определяется аналогично $\alpha_{ц}$).

В качестве приемного устройства бортовой аппаратуры систем управления может служить антенная решетка [4-6, 9].

Вариант 2. Ориентация приборов бортовой аппаратуры систем управления на основе метода радиоинтерферометрических измерений [4-6, 10, 13-15] (рис.1, 2).

Реализация варианта основана на том, что разнесенные на некоторое расстояние AB (базу) две ненаправленные или слабонаправленные антенны принимают сигнал от одного источника. Измерительное устройство оценивает разность хода сигнала до антенн (Δr), которая определяет положение базовой линии (ее центр) относительно КА, но не в пространстве (рис.2).

Для оценки ориентации базовой линии в двумерном пространстве необходимо иметь разность хода относительно второго КА. Величины, определяющие ориентацию базы в двумерном пространстве, представлены на рис.3, где C_1 и C_2 – соответственно КА₁ и КА₂; AB – базовая линия с центром D ; Θ – угол прихода волны.

Когда $AB = d$ и лежит в плоскости C_1C_2D (или является проекцией на эту плоскость), и, полагая $1 \gg (d/2R^2)$, разности хода сигналов C до антенн A и B определим из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \Delta r_1 &= r_{1B} - r_{1A} = d \cos \Theta_1; \\ \Delta r_2 &= r_{2B} - r_{2A} = d \cos \Theta_2; \\ \Delta r_1 - \Delta r_2 &= d(\cos \Theta_1 - \cos \Theta_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку $\alpha_1 = \Theta_1 - \vartheta$ и $\alpha_2 = \Theta_2 - \vartheta$, подставив их в выражение (3), получим

$$(E_1^2 + E_2^2) \cos^2 \vartheta - 2E_1 E_2 \cos \vartheta + E_3^2 - E_2^2 = 0, \quad (4)$$

где $E_1 = \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2$; $E_2 = \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1$; $E_3 = (\Delta r_1 - \Delta r_2)/d$.

Углы α_1 и α_2 находят по известным координатам КА и центра базы (D). Длина базы считается известной, а разности Δr_1 и Δr_2 измеряют:

$$\Delta r_1 = \lambda(n_{1B} - n_{1A}) + \frac{\lambda}{2\pi} (\varphi_{1B} - \varphi_{1A});$$

$$\Delta r_2 = \lambda(n_{2B} - n_{2A}) + \frac{\lambda}{2\pi} (\varphi_{2B} - \varphi_{2A}),$$

где n – число целых длин волн, укладываемых на трассе КА- D ; φ – фаза колебания, принятого антенной от КА.

Угол ϑ находится из решения уравнения (4) и характеризует положение базы (фрагмента ЛА) в двумерном пространстве.

Особенности организации навигационных измерений в аппаратуре малоподвижных и стационарных потребителей. Использование рабочего созвездия КА позволяет решать две основные задачи геодезии – абсолютную и относительную. Абсолютная задача сводится к определению координат объектов в абсолютной геоцентрической системе координат. Относительная задача предполагает нахождение относительных координат двух и более объектов (пунктов) без существенных ограничений на точность их абсолютных координат.

В отличие от традиционных навигационных определений решение геодезических задач зачастую не требует высокой оперативности. В то же время требования по точности абсолютных и, особенно, относительных определений в геодезии значительно выше, что приводит к необходимости более тщательного учета всех составляющих ошибок, которые и определяют конечную точность решения геодезической задачи. Причем особо возрастает роль систематических и медленноменяющихся составляющих погрешностей, которые не могут быть сглажены (отфильтрованы) при снятии ограничений на объем измерительной информации и оперативность определения координат [4-6, 11-20].

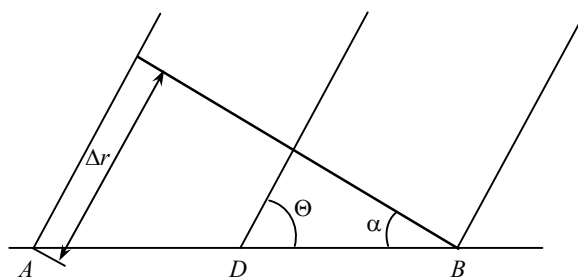


Рис.2. Диаграмма определения ориентации базы методом радиоинтерферометрических измерений

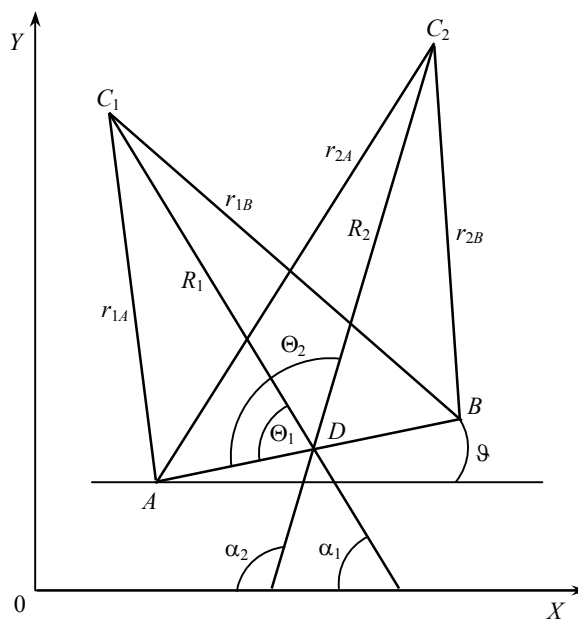


Рис.3. Определение ориентации базы в двумерном пространстве

Принципиальное отличие задачи геодезических измерений от традиционных навигационных состоит в том, что определяющихся объектов два и более, они пространственно разнесены, измерения проводятся, как правило, одновременно, между объектами возможны информационный обмен, взаимные измерения, сверка шкал часов и синхронизация частот генераторов (например, при создании пунктов локальной геодезической сети).

Возможна компенсация системных ошибок, являющихся общими для определяющихся объектов, или ошибок, относящихся к разным объектам, между которыми существует аналитическая или статистическая связь. Существует аналогия с двухчастотным методом компенсации ионосферных составляющих ошибок в навигации, когда введение частотной избыточности позволяет получить информацию о состоянии ионосферы и тем самым учесть ее негативное воздействие. Точно так же введение пространственной (пространственно-частотной) избыточности (два разнесенных объекта) позволяет компенсировать (при некоторых условиях) такие составляющие ошибок, как ионосферные, тропосферные, расхождение шкал КА и другие. Причем компенсация возможна как за счет образования соответствующих разностей, так и за счет расширения состава оцениваемых параметров [1, 2, 11-15].

Промежуточное положение по точности занимает дифференциальный режим (метод транслокации), когда считаются известными координаты одного из пунктов (контрольной станции).

Таким образом, даже решение абсолютной задачи геодезии, но для двух и более пунктов, позволяет получить более высокую точность координат пунктов, чем для единичного объекта навигации. Еще большая точность может быть получена при определении относительных координат пунктов.

Особенности процессов обработки бортовой аппаратурой данных комплексированных систем управления. При создании современных навигационных систем значительное место занимает процесс разработки эффективных алгоритмов обработки навигационной информации. Это особенно актуально при проектировании сложных комбинированных навигационных систем, для которых характерно наличие избыточной информации и предусматривается ее комплексная обработка с целью повышения точности определения основных навигационных параметров. Применительно к КСУ ВДО в состав этих параметров входят координаты и скорость полета, а также углы, задающие ориентацию объектов в пространстве.

Совершенствование алгоритмов фильтрации навигационных измерений связано с необходимостью более адекватного описания реального процесса функционирования навигационного комплекса, учета различных неконтролируемых факторов [3-7, 13-19]. В большинстве случаев результат оценивания погрешностей ИНС используется для коррекции автономных средств по схеме компенсации (рис.4).

Измеренные значения вектора состояния $X(t)$ на выходе ИНС и АП СРНС могут быть представлены в виде

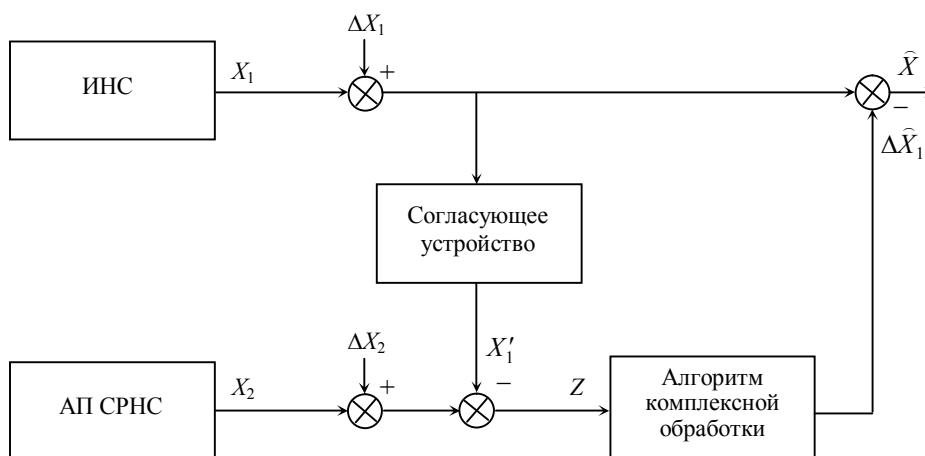


Рис.4. Схема комплексирования ИНС и АП СРНС по способу компенсации

$$X_1(t) = X(t) + \Delta X_1(t);$$

$$X_2(t) = X(t) + \Delta X_2(t),$$

где $\Delta X_1(t)$ и $\Delta X_2(t)$ – соответственно ошибки ИНС и АП СРНС.

Вектор наблюдения для оптимального фильтра имеет вид

$$Z(t) = X_2(t) + \Delta X'_1(t),$$

где X'_1 – сигнал ИНС после согласующего устройства [2, 5].

На выходе фильтра формируется оптимальная оценка вектора ошибок ИНС $\Delta \hat{X}_1(t)$, которая затем используется для коррекции значений вектора состояния $X_1(t)$ и получения вектора $\hat{X}(t)$. Основными возмущающими факторами для уравнений ошибок $\Delta X_1(t)$ являются неучтенные дрейфы гироскопов и ошибки акселерометров. Эти возмущения имеют низкочастотный характер. Зависимость неучтенных дрейфов гироскопов, погрешностей акселерометров от конструктивных особенностей, условий функционирования и динамики движения объекта позволяет рассматривать эти возмущения как неопределенные.

Наибольшее распространение при оценке навигационных параметров получили алгоритмы на основе фильтра Калмана (ФК) и его модификаций. Благодаря невысокой сложности технической реализации вычислительных алгоритмов они нашли широкое применение в бортовой аппаратуре систем управления различных летательных аппаратов. Однако в условиях повышения требований к точностным характеристикам современных навигационных комплексов представление в моделях данных алгоритмов линейной фильтрации неконтролируемых факторов в виде случайных процессов с известными характеристиками часто не соответствует действительности. В условиях неопределенности универсальным подходом к решению подобного рода задач является использование адаптивных алгоритмов, но они сложны при реализации в бортовых ЭВМ [9-16].

Перспективным направлением разработки алгоритмов оценивания является объединение в алгоритме фильтрации стохастической и минимаксной постановки (реализация стратегии гарантированной надежности навигационных определений). Примером такого алгоритма является минимаксно-стохастический (МС) фильтр [1, 4-7, 12-18]. Уравнения фильтрации данного алгоритма по форме совпадают с аналогичными уравнениями ФК и имеют вид

$$\dot{\hat{x}}(t) = A(t)\hat{x}(t) + B(t)u(t) + K(t)[y(t) - C(t)\hat{x}(t)], \quad \hat{x}(t_0) = m_{p0};$$

$$K(t) = (R_s(t) + P_\Delta(t))C(t)(\Theta Q(t) + \mu^2 P_2^{-1}(t))^{-1};$$

$$\dot{R}_s(t) = (A(t) - K(t)C(t))R_s(t) + R_s(t)(A(t) - K(t)C(t)) + \Theta(K(t)Q(t) + H(t)G(t))H(t),$$

$$R_s(t_0) = R_0\Theta; \tag{5}$$

$$\dot{P}_\Delta(t) = (A(t) - K(t)C(t))P_\Delta(t) - P_\Delta(t)(A(t) - K(t)C(t)) + \mu^2(K(t)P_2^{-1}(t)K(t) + D(t)P_1^{-1}D(t));$$

$$P_\Delta(t_0) = \mu^2 P_0^{-1};$$

$$\Theta = \kappa \zeta^{-2} [\exp(-2\kappa \zeta^{-2}) + 1]^{-1} [\kappa - 1 + \exp(-2\kappa \zeta^{-2}) (\kappa + 1)],$$

где $A(t)$, $C(t)$, $D(t)$, $Q(t)$, $G(t)$, $H(t)$ – известные матрицы; $A(t)$ – динамическая матрица вектора состояния; $B(t)$ – матрица управления; $u(t)$ – вектор управления; $K(t)$ – матрица коэффициентов усиления (в отличие от ФК она имеет не только случайную составляющую возмущений, но и неопределенную); $C(t)$ – матрица наблюдения; $R(t)$ – корреляционная матрица; Θ – согласующий параметр (число от 0 до 1, учитывающее вес неопределенной и случайной составляющих); $Q(t)$ – матрица шумов измерений; μ^2 – параметр ограничения неопределенных возмущений; $P_1(t)$, $P_2(t)$ – заданные весовые матрицы.

Элементы матрицы $R_s(t)$ определяют эллипсоид рассеивания, полуоси которого равны средним квадратическим отклонениям компонентов вектора случайных возмущений.

Матрица $P_{\Delta}(t)$ характеризует область, обусловленную воздействием неопределенной составляющей m_n . Эта область может быть аппроксимирована эллипсоидом [7]. Определив собственный вектор β матрицы $P_{\Delta}(t)$, соответствующий ее наибольшему собственному значению γ , можно найти главную полуось аппроксимирующего эллипсоида. Проецируя вектор α на главную полуось эллипсоида, получим число α_1 . В этом случае при практической реализации алгоритма минимаксно-стохастической фильтрации должна быть определена процедура выбора числа α_1 , характеризующего интервал попадания $[-\alpha_1, \alpha_1]$.

Для вычисления согласующего параметра Θ при известном α_1 определяются параметры минимаксно-стохастического фильтра κ и ζ :

$$\kappa = \Delta_1^2 \alpha_1^{-1}; \quad \zeta = \sigma_s^2 \alpha_1^{-1}, \quad (6)$$

где $\Delta_1^2 = \gamma$ – наибольшее собственное значение неотрицательно определенной матрицы $P_{\Delta}(t)$; $\sigma_s^2 = \beta^T R_s \beta$ – неотрицательно определенная квадратичная форма; β – собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному значению γ матрицы $P_{\Delta}(t)$.

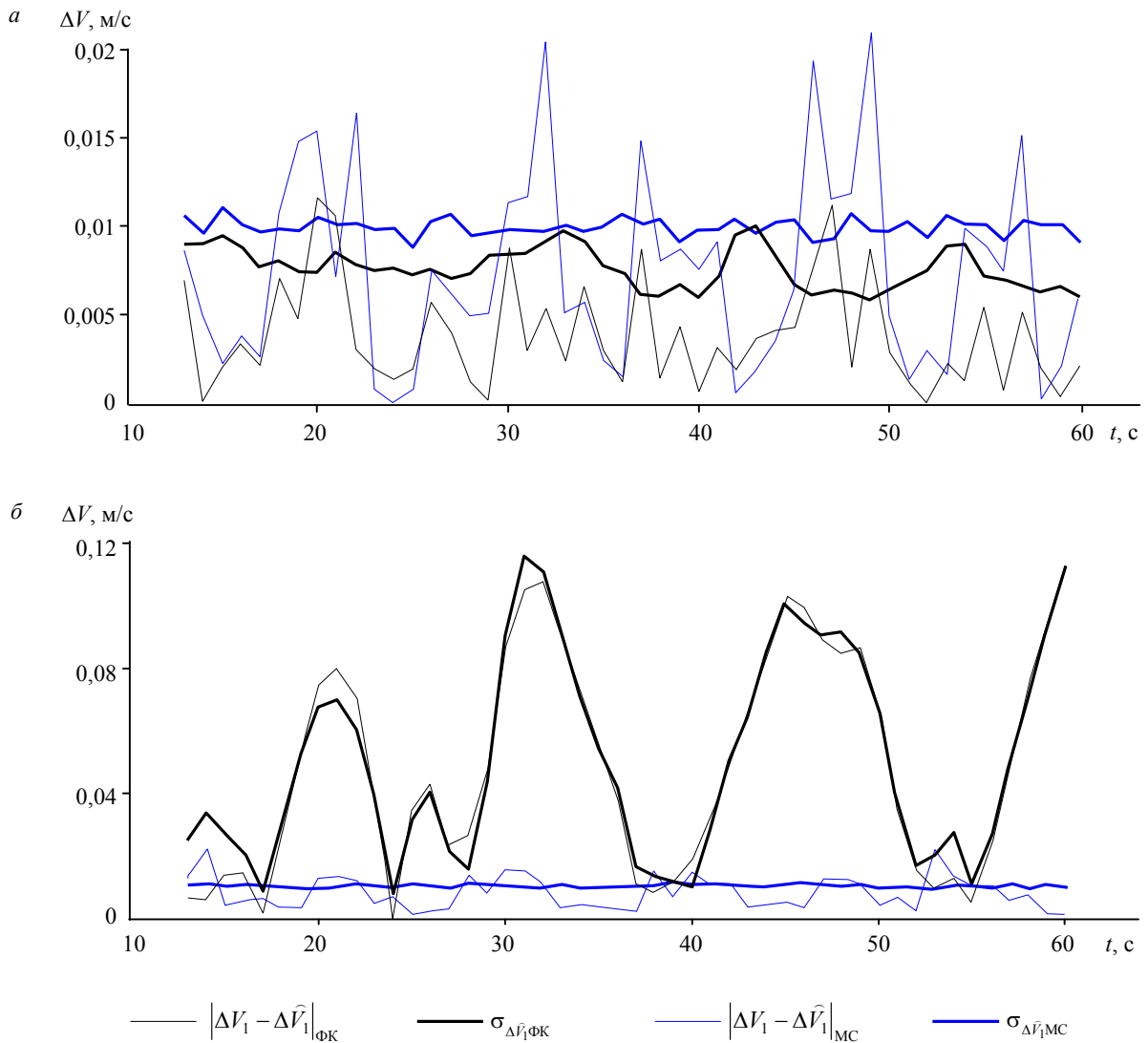


Рис.5. Ошибки оценивания погрешности ИНС по скорости для фильтра Калмана и минимаксно-стохастического фильтра при минимальном (а) и максимальном (б) уровне возмущений

После вычисления матриц $P_{\Delta}(t)$ и $R_s(t)$ в системе уравнений (5) из системы (6) находят параметры κ и ζ , которые при известном α_1 определяют в каждый момент времени численное значение P – вероятность попадания в заданный интервал $[-\alpha_1, \alpha_1]$,

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{-\alpha_1 - \Delta_1}{\sigma_s}}^{\frac{\alpha_1 - \Delta_1}{\sigma_s}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right) d\xi.$$

Синтезированный на основе выбранного критерия минимаксно-стохастический фильтр при любом Δ_1 обеспечивает максимальное значение P , однако при различных фиксированных κ максимальные значения P могут быть существенно различны.

Были определены зависимости ошибок оценивания погрешностей ИНС по скорости для фильтра Калмана и минимаксно-стохастического фильтра при минимальных и максимальных значениях неопределенных возмущений (рис.5). Установлено, что оценки минимаксно-стохастического фильтра при максимальных возмущениях более устойчивы, это позволяет сделать вывод о целесообразности использования данного алгоритма фильтрации для высокодинамичных объектов [4-6, 10-15].

Таким образом, основными достоинствами минимаксно-стохастических фильтров являются:

- высокая устойчивость процесса фильтрации;
- высокая точность оценивания параметров на основе более адекватного учета процесса образования возмущений;
- отсутствие дополнительного расширения вектора состояния благодаря сохранению линейности структуры алгоритма и совпадению по форме с уравнениями ФК.

Заключение. Как показывают исследования [4-16, 18-20], реализация рассмотренных теоретических положений, способов, алгоритмов и процедур в навигационной аппаратуре комплексированных систем управления, а в перспективе – при построении систем высокоточного навигационно-временного обеспечения высокодинамичными летательными аппаратами, позволит:

- иметь на борту ЛА несколько альтернативных навигационных систем;
- повысить надежность навигационных измерений (определений);
- повысить мобильность существующих и перспективных ЛА;
- повысить автономность навигационных определений;
- несколько упростить существующую аппаратуру топогеодезической привязки и навигации;
- более точно формировать начальные условия выставки бортовой аппаратуры систем управления ЛА и производить их корректировку в полете;
- сократить время подготовки и пуска ЛА;
- в большей степени автоматизировать процессы предстартовой подготовки высокоманевренных подвижных объектов и летательных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
2. Вопросы приема и обработки сигналов в измерительных каналах навигационных и геодезических систем / Н.Ф.Клюев, М.Г.Степанов, Е.А.Ткачев, В.Ф.Фатеев; ВИКА им. А.Ф.Можайского. СПб, 1996. 80 с.
3. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. М.: КНИЦ, 2012. 168 с.
4. Колесниченко С.В. Обоснование систем навигационно-временного обеспечения комплексированных систем управления высокодинамичных летательных аппаратов // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2011. № 3. С.67-74.
5. Колесниченко С.В. Актуальные вопросы навигационно-временного обеспечения комплексированных систем управления подвижных высокодинамичных объектов // Анализ и прогнозирование систем управления: Труды XIII Международной НПК. СПб: Изд-во СПГУПС, 2012. С.434-449.
6. Колесниченко С.В. Обоснование теоретических положений построения комплексированных систем управления высокодинамичных объектов // Вопросы оборонной техники: Научно-технический журнал. Серия 16. Вып.9-10 (75-76), 2014. С.28-32.
7. Куркин О.М. Минимаксная обработка информации. М.: Энергоатомиздат, 1990. 216 с.

8. *Матвеев В.В.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В.Матвеев, В.Я.Распопов, ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». СПб, 2009. 280 с.
9. Патент РФ № 2150124, МПК G01S5/00, F41G7/00. Способ предстартовой выставки бортовой аппаратуры высокоточных ракет / С.В.Колесниченко, Е.И.Суворин, Д.А.Первухин. Опубл. 27.05.2000.
10. Патент на полезную модель № 36500, МПК F41G7/22. Беспилотный летательный аппарат / С.В.Колесниченко, А.А.Сулима, Д.А.Первухин. Опубл. 10.03.2004.
11. *Пятков В.В.* Методики анализа динамических ошибок в комбинированных телевизионных следящих системах / В.В.Пятков, А.В.Мелешко // Вопросы радиоэлектроники. Техника телевидения. 2010. Вып.2. С.84-89.
12. *Сейдж Э.* Теория оценивания и ее применение в связи и управлении летательными аппаратами / Э.Сейдж, Д.Мелса. М.: Связь, 1976. 496 с.
13. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Под ред. В.С.Шебшаевича. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
14. Свидетельство на полезную модель 6055, МПК G01C21/24. Авиационно-космическая навигационная система / С.В.Колесниченко, С.М.Коломейцев, О.В.Тиханычев. Опубл. 06.11.96.
15. *Соловьев Ю.А.* Спутниковая навигация и ее приложения. М.: Эко-Трендз, 2003. 326 с.
16. *Степанов О.А.* Применение теории нелинейной фильтрации при решении задач обработки навигационной информации / ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор». СПб, 1998. 348 с.
17. Федеральная целевая программа РФ «Глобальная навигационная система» на 2012-2020 годы: Постановление Правительства Российской Федерации от 3 марта 2012 года № 189 // Российская газета от 04.03.2012. № 3574.
18. *Bond K.* Location of GPS Interference using Adaptive Antenna Technology / K.Bond, J.Brading // ION GPS-2000 Proc, Sault Lake City, Utah, 2000. P.134-143.
19. *Bukov V.N.* Synthesis of controls through a forecasting model in adaptive control system // Problems of Control and information Theory. 1980. Vol.9(5). P.329-337.
20. Designing of distributed control system with pulse control / S.V.Kolesnichenko, Y.V.Ilushin, D.A.Pervuchin, O.V.Afanaseva, A.A.Klavdiev // Middle-East Journal of Scientific Research. 21(3). 2014. P.436-439.

REFERENCES

1. *Babich O.A.* Obrabotka informatsii v navigatsionnykh kompleksakh (*Information processing in navigational systems*). Moscow: Mashinostroenie, 1991, p. 512.
2. *Klyuev N.F., Stepanov M.G., Tkachev E.A., Fateev V.F.* Voprosy priema i obrabotki signalov v izmeritel'nykh kanalah navigatsionnykh i geodezicheskikh sistem (*Reception and processing of signals in the measuring channels of navigation and geodetic systems*). VIKА im. A.F.Mozhaiskogo. St Petersburg, 1996, p.80.
3. GLONASS. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument (*The interface control document*). Moscow: KNITs, 2012, p.168.
4. *Kolesnichenko S.V.* Obosnovanie sistem navigatsionno-vremennogo obespecheniya kompleksirovannykh sistem upravleniya vysokodinamichnykh letatel'nykh apparatov (*Substantiation of systems of navigation and time support integrated control systems highly dynamic aircraft*). Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie. 2011. N 3, p.67-74.
5. *Kolesnichenko S.V.* Aktual'nye voprosy navigatsionno-vremennogo obespecheniya kompleksirovannykh sistem upravleniya podviznykh vysokodinamichnykh ob"ektov (*Topical issues of navigation and time support integrated control systems highly dynamic moving objects*). Analiz i prognozirovanie sistem upravleniya: Trudy XIII Mezhdunarodnoi NPK. St Petersburg: Izd-vo SPGUPS, 2012, p.434-449.
6. *Kolesnichenko S.V.* Obosnovanie teoreticheskikh polozhenii postroeniya kompleksirovannykh sistem upravleniya vysokodinamichnykh ob"ektov (*Justification of the theoretical principles of complex control systems of dynamic objects*). Voprosy oboronnoi tekhniki: Nauchno-tekhnicheskii zhurnal. Seria 16. N 9-10 (75-76), 2014, p.28-32.
7. *Kurkin O.M.* Minimaksnaya obrabotka informatsii (*Minimax information processing*). Moscow: Energoatomizdat, 1990, p.216.
8. *Matveev V.V., Raspopov V.Ya.* Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh sistem (*Fundamentals of building strapdown inertial navigation systems*). GNTs RF ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». St Petersburg, 2009, p.280.
9. *Kolesnichenko S.V., Suvorin E.I., Pervukhin D.A.* Sposob predstartovoi vystavki bortovoi apparatury vysokotochnykh raket (*Method of the pre-launch on-Board equipment exhibition*). Patent RF N 2150124, IPC G01S5/00, F41G7/00. Published 27.05.2000.
10. *Kolesnichenko S.V., Sulima A.A., Pervukhin D.A.* Bespilotnyi letatel'nyi apparat (*Unmanned aircraft*). Patent for useful model No 36500, IPC F41G7/22. Published 10.03.2004.
11. *Pyatkov V.V., Meleshko A.V.* Metodiki analiza dinamiceskikh oshibok v kombinirovannykh televizionnykh sledyashchikh sistemakh (*Methods of analysis of dynamic errors in combined-governmental TV tracking systems*). Voprosy radioelektroniki. Tekhnika televideniya. 2010. Iss.2, p.84-89.
12. *Seidzh E., Melsa D.* Teoriya otsenivaniya i ee primeneniya v svyazi i upravlenii letatel'nymi apparatami (*Theory and its application in communication and managing aircraft*). Moscow: Svyaz', 1976, p.496.
13. Setevye sputnikovye radionavigatsionnye sistemy (*Network satellite navigation system*). Under the editorship of V.S.Shebshaevich. Moscow: Radio i svyaz', 1993, p.408.
14. *Kolesnichenko S.V., Kolomeytshev S.M., Tichanychev O.V.* Aviatsionno-kosmicheskaya navigatsionnaya sistema (*Aeronautical navigation system*). Patent for useful model N 6055, IPC G01C21/24. Published 06.11.96.

15. Soloviev Yu.A. Sputnikovaya navigatsiya i ee prilozheniya (*Satellite navigation and its applications*). Moscow: Eko-Trendz, 2003, p.326.
16. Stepanov O.A. Primenenie teorii nelineinoi fil'tratsii pri reshenii zadach obrabotki navigatsionnoi informatsii (*Application of the theory of nonlinear filtering in solving problems of processing navigation information*). St Petersburg: GNTs RF TsNII «Elektroprigor», 1998, p.348.
17. Federal'naya tselevaya programma RF «Global'naya navigatsionnaya sistema» na 2012-2020 gody (*Federal target program of the Russian Federation global navigation system in 2012-2020*): Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 3 marta 2012 goda N 189. Rossiiskaya gazeta ot 04.03.2012. N 3574.
18. Bond K., Brading J. Location of GPS Interference using Adaptive Antenna Technology. ION GPS-2000 Proc, Sault Lake City, Utah, 2000, p.134-143.
19. Bukov V.N. Synthesis of controls through a forecasting model in adaptive control system. Problems of Control and information Theory. 1980. Vol.9(5), p.329-337.
20. Kolesnichenko S.V., Ilushin Y.V., Pervuchin D.A., Afanaseva O.V., Klavdiev A.A. Designing of distributed control system with pulse control. Middle-East Journal of Scientific Research. 21(3). 2014, p.436-439.

NAVIGATION AND TIME SUPPORT MANAGEMENT SYSTEMS BY HIGHLY DYNAMIC MOVING OBJECTS

D.A.PERVUCHIN, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, pervuchin@rambler.ru*
S.V.KOLESNICHENKO, *PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, serjkop@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

Researched topical issues of improving the accuracy of the application of high-dynamic aircraft used for the purpose of mineral exploration, environmental monitoring, security, environmental and fire safety, as well as the decisions of other special tasks. The possible variants of construction of control systems of dynamic objects on the basis of integration of traditional inertial navigation systems and user equipment of a network of satellite navigation systems. Justified some schematics, technical and constructive solutions for development of advanced navigation equipment of the aircraft.

Key words: highly dynamic objects, control systems, alternative navigation system, integration, navigation and time support, technical level, efficiency.

Геоэкология и безопасность жизнедеятельности

Engineering geology and health and safety

УДК 622.88:502.65

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ СПОСОБЫ КОНСЕРВАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

М.А.ПАШКЕВИЧ, *д-р техн. наук, профессор, mpash@spti.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты мониторинга и оценки негативного воздействия хранилищ отходов минерально-сырьевого комплекса, являющихся техногенными месторождениями. Проведены исследования по разработке экологически безопасных и экономически эффективных способов консервации техногенных месторождений на основе формирования экранов из полимерных материалов в оплавленном совместно с грунтами состоянии. В результате проведенных лабораторных исследований и экспериментов на опытных площадках выбрана оптимальная технология формирования экрана.

Ключевые слова: техногенные месторождения, техногенные массивы, отходы минерально-сырьевого комплекса, консервация хранилищ отходов, экраны из полимерных материалов.

К настоящему времени в Российской Федерации в хранилищах отходов добычи и переработки полезных ископаемых накоплено свыше 50 млрд т потенциального минерального сырья с содержаниями металлов, в ряде случаев превышающих их содержание в рудах, извлекаемых из недр и поступающих на обогащение [2, 5]. Такие высокие содержания металлов особенно характерны для техногенных массивов, сформировавшихся в начале и середине прошлого века, когда технологии извлечения полезных компонентов были несовершенны, а кондиции добычи и переработки превышали современные в несколько раз [10]. Вследствие ветровой и водной эрозии в районах размещения техногенных массивов происходит не только утрата ценных компонентов, но и формирование ореолов загрязнения покровных отложений и подземных вод общей площадью более 4 млн га, ухудшение санитарно-гигиенической обстановки, нарушение и видоизменение естественных ландшафтов [6, 8].

Необходимость консервации и дальнейшей разработки техногенных месторождений диктуется рядом имеющихся экономических, социальных и экологических проблем [1, 4]:

- Истощение запасов полезных ископаемых и обусловленное этим постоянное ухудшение горно-геологических условий добычи при эксплуатации глубокозалегающих месторождений и бедных руд.
- Постоянный рост стоимости минерального сырья (в среднем на 5 % в год).
- Вывод из хозяйственного оборота территорий, занятых техногенными массивами и загрязненных вследствие пылевых наносов с отвалов и хвостохранилищ.
- Загрязнение приповерхностных отложений, поверхностных и подземных вод, атмосферного воздуха тяжелыми металлами, кислотными водами, галоидными соединениями и др.

Целью проводимых исследований являлось сохранение истощающихся минеральных ресурсов техногенных месторождений и ликвидация источников загрязнения окружающей среды путем экранирования месторождений полимерными материалами в оплавленном совместно с грунтами состоянии.

Консервация техногенных месторождений производится тремя основными способами [4, 9]:

- экранированием уплотненными природными глинами;
- изоляцией дна, стенок и поверхности хранилищ отходов полимерными листами (геомембранами);
- формированием изоляционного слоя на основе отходов нефтедобычи.

Существующие способы имеют ряд недостатков.

Способ экранирования с использованием природных глин крайне трудоемок, так как требует большого количества (от 0,35 до 1 м³/м²) применяемого материала и его предварительной обработки для последующего нанесения. Минералы глин при эксплуатации экрана на техногенных месторождениях с сульфидной минерализацией подвергаются воздействию агрессивных кислых дренажных вод, что приводит к изменению структурного состояния глинистых минералов с их последующим растворением. Таким образом, первоначальная прочность материала постепенно снижается, а, следовательно, повышается риск потери ценных компонентов с инфильтрующимися через экран дренажными водами.

Способ изоляции техногенных месторождений с применением геомембран является дорогостоящим (стоимость геомембран до 400 руб./м²), кроме того, при укладке требуется специально подготовленный высококвалифицированный персонал. Экранирование производится из полотен геомембран со сварными швами, причем на швах с высокой степенью вероятности проявляются дефекты в целостном покрытии при воздействии климатических, гидрографических и техногенных факторов, что снижает эффективность консервации.

Основными недостатками способа формирования изоляционного слоя на основе отходов нефтедобычи является токсичность применяемых материалов и склонность к разрушению при воздействии агрессивных жидкостных сред. В этой связи возникает необходимость разработки нового, долговечного, экономически эффективного и экологически безопасного способа консервации техногенных месторождений.

С 2003 г. на кафедре геоэкологии Горного университета проводятся работы по разработке и совершенствованию нового способа консервации техногенных месторождений, базирующегося на экструзивном нанесении смеси из отходов полимеров на подготовленную поверхность дна, стенок и поверхности техногенных месторождений.

Разрабатываемый способ консервации заключается в следующем. Поверхность подготавливается путем выравнивания, очистки от неоднородностей различного генезиса. После этого производится глинизация поверхностей (формируется глинистый слой мощностью 0,2-0,4 м), формируется подстилающий слой из песков средней крупности, мощность которого составляет 0,15-0,2 м. Гидроизоляционная смесь наносится экструзивно при температуре плавления смеси 180-190 °С, на остывшую поверхность наносится дренажный слой из крупнозернистого материала (песок) толщиной 0,1-0,15 м.

Экранирующее покрытие при складировании минеральных отходов, формирующих техногенное месторождение, должно иметь следующие свойства:

- создаваемое покрытие с высокими прочностными характеристиками, так как масса складированных отходов составляет 10⁴-10⁷ тыс.т, что определяет высокую статическую нагрузку на укладываемый в основание полимерный материал;
- полимерное покрытие – стойкое к воздействию агрессивных сред, так как при сульфидной минерализации происходит формирование кислых дренажных вод;
- прочность покрытия, не зависящая от сезонных значительных перепадов температур.

Структура полимерных материалов определяется из двух основных уровней – молекулярного и надмолекулярного [4, 5, 7].

На этапе синтеза полимера происходит формирование его молекулярной структуры. При изменении параметров полимеризации (давление, температура и др.) регулируется молекулярная масса полимера. Надмолекулярная структура формируется на этапе переработ-

ки полуфабриката в готовый продукт. Типы и размеры надмолекулярных образований определяются способом переработки полимера, температурой, давлением, режимом охлаждения и др.

Для нахождения оптимальной рецептуры и условий формирования изоляционных покрытий были изготовлены образцы полиэтилена (низкого и высокого давления) и полипропилена (ПЭНД, ПЭВД, ПП) путем экструзии гранулированных полимеров в виде листов размерами 200×600 мм, с последующим охлаждением со скоростями, моделирующими реальные полевые условия. Для каждого полимера изготавливались листы различной толщины (1, 3 и 6 мм) для определения зависимости прочностных характеристик формируемого покрытия от толщины формируемого слоя.

Проведенные эксперименты показали, что температура перехода из высокоэластичного состояния в вязкотекучее для исследуемых полимеров составляет для ПЭВД – 120, ПЭНД – 135, ПП – 170 °С. Исходя из установленных температур плавления, для определения зависимости физико-механических характеристик полимерных образцов от температуры формирования покрытия был определен шаг в 10 °С в интервале от 120 до 220 °С. В ходе проводимых исследований определялись показатели, характеризующие прочность полимерного изделия.

Определение показателей, характеризующих прочность полимерных материалов, осуществлялось на универсальной испытательной машине с серво-электромеханическим приводом для статических испытаний материалов на растяжение, сжатие, изгиб Н75К-S.

По результатам проведенных экспериментов были получены графические зависимости изменения прочностных характеристик тестируемых полимеров от температуры их переработки при экструзивном получении листовых образцов. Зависимости прочности при растяжении σ_b образцов различной толщины от температуры переработки представлены на рис.1.

Анализ зависимостей изменения прочности покрытий от температуры переработки показал следующее:

- изготовление полимерного покрытия при различных температурах сопровождается нелинейным изменением прочности полимеров;
- значения разрывной прочности полимерных образцов, полученных при температурах, близких к температуре плавления, не являются максимальными, что объясняется неполнотой гомогенизации расплава (96–98 %), наличием избытка влаги и летучих примесей;
- оптимальные значения температур для переработки полимерного гранулята лежат в установленном диапазоне 180-200 °С;
- снижение прочностных характеристик исследуемых образцов при температурах выше 200 °С определяется процессами термической и термоокислительной деструкции.

Далее проводились экспериментальные исследования разрушения экрана при воздействии климатических и эксплуатационных факторов, так как гидроизоляционное основание в процессе отсыпки штабеля и последующей эксплуатации подвергалось нагрузкам, приводящим к нарушению целостности структуры полимерного материала.

Повреждение формируемого покрытия может происходить во время его производства, при последующей укладке, но основное количество повреждений чаще всего наблюдается в процессе эксплуатации изоляционного материала. Определение прочности материала и его устойчивости к повреждениям производилось лабораторными экспериментами, путем определения прочностных параметров исследуемых материалов по методике В.Д.Глебова [3].

При проведении экспериментов исследуемый листовый материал помещался в гидравлический пресс марки Д2430Б в емкость размерами, соответствующими испытываемому образцу, с моделированием условий укладки полимерного покрытия в гидроизоляционное основание, и доводился до разрушения нормальной к поверхности образца нагрузкой, создаваемой головкой в форме штампа.

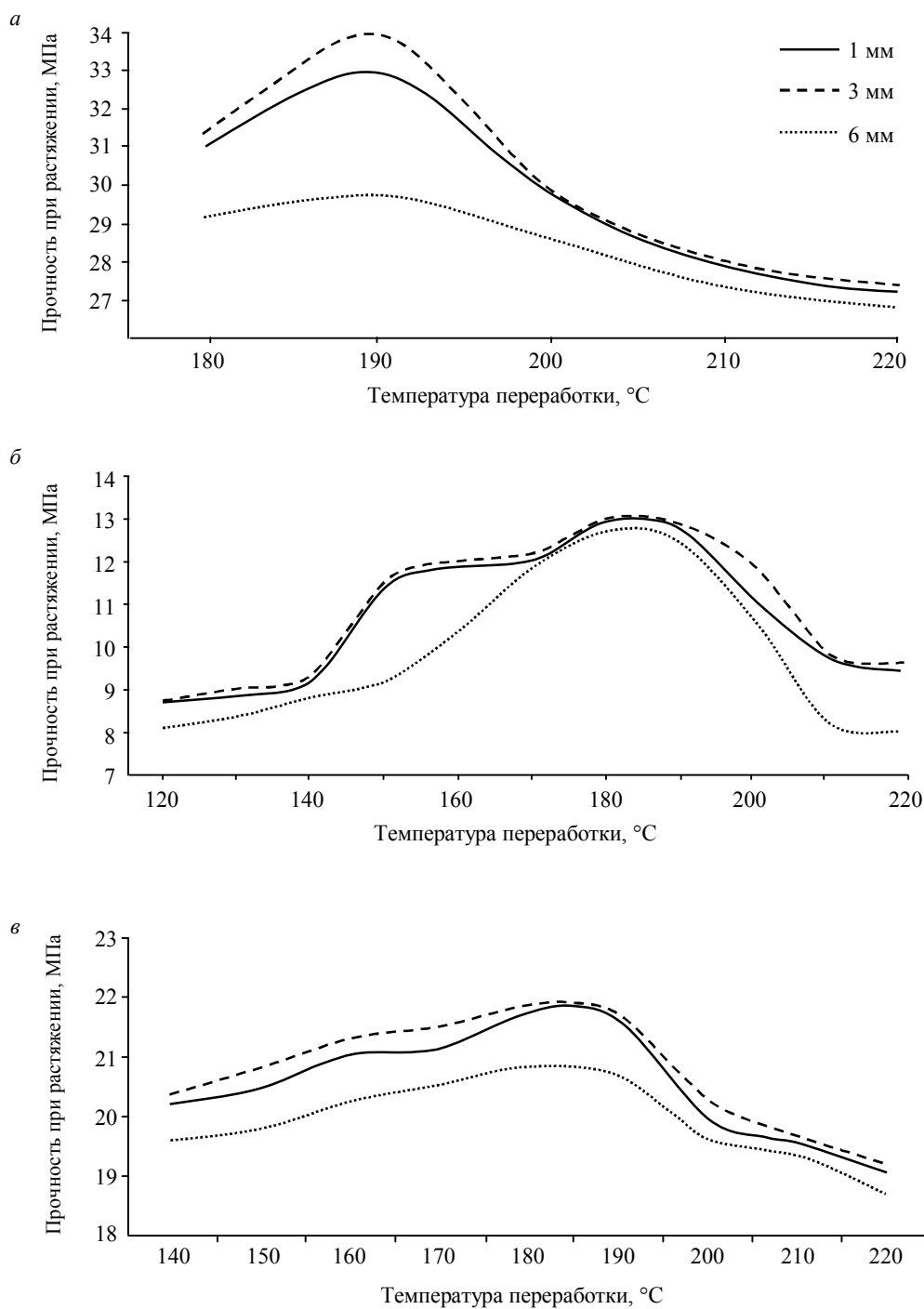


Рис. 1. Зависимость изменения прочности ПП (а), ПЭВД (б), ПЭНД (в) от температуры переработки

В соответствии с методикой В.Д.Глебова [3] различают повреждения первого и второго рода. Повреждение первого рода определяется изменением свойств гидроизоляционного материала при наблюдении вмятин, заломов и остальных несквозных повреждений, повреждение второго рода – присутствием в образце сквозных нарушений.

По результатам проведенных исследований устойчивости гидроизоляционных материалов на основе ПП, ПЭВД, ПЭНД соответствующих марок и различной толщины были сделаны следующие выводы:

- общим показателем для образцов толщиной 1 мм является быстрое возникновение повреждений в интервале приложенной нормальной нагрузки от 0,4 до 1,0 МПа. Такое явление объясняется тем, что при приложении нормальной нагрузки к грунтам на границе контакта отдельных частиц и полимерного материала повреждения второго рода возникают практически одновременно;

- сквозные повреждения образцов толщиной 3 и 6 мм отсутствуют в интервале от 0,2 до 1,7 МПа, в случае образцов полипропилена предел устойчивости достигает 2 МПа. Это объясняется тем, что при достижении критических значений давлений в контакт с полимерным покрытием вступают крупные частицы с более острыми гранями и выступами, а также частицы, первоначально не имевшие прямого контакта с исследуемым образцом;

- при минимальных давлениях и статистическом распределении частиц грунтового материала с поверхностью изоляционного покрытия контактирует лишь малое количество частиц с острыми гранями или выступами, что подтверждается отсутствием повреждений второго рода в интервале создаваемой нагрузки от 0,2 до 0,4 МПа;

- рост повреждений второго рода в интервале от 0,4 до 1,5 МПа определяется увеличением площади уже проявившихся повреждений, что говорит о высоком уровне упругих и прочностных свойств испытываемых материалов;

- в интервале давления от 1,5 до 2,5 МПа увеличение площади повреждений определяется повышением количества повреждений с преобладанием образований малой площади;

- образцы всех исследуемых материалов толщиной 3 и 6 мм имеют высокий запас прочности. Порог устойчивости таких образцов превышает расчетные нагрузки, создаваемые строительными механизмами и телом хранилища отходов;

- по результатам исследований выявлено, что наибольшую прочность при приложении нормальных нагрузок имеют образцы, изготовленные из полипропилена.

Гидроизоляционное основание, укладываемое в основание хранилищ отходов (в случае сульфидных отходов) испытывает воздействие агрессивной (кислой) среды, что напрямую сказывается на его прочностных свойствах. Под действием агрессивных сред в полимерных материалах происходит хемодеструкция. Для исследования трансформации полимерных материалов под действием агрессивной среды образцы помещались в агрессивный раствор, и далее осуществлялось наблюдение с фиксированием изменения их массы и линейных размеров. Испытание проводилось в течение 16 недель, промежуточный контроль изменения массы и линейных размеров образцов осуществлялся в соответствии с приведенными рекомендациями со следующими интервалами: 1 – 2 – 4 – 8 – 16 недель. Деструктивные процессы, протекающие в полимерных материалах под действием агрессивной среды, напрямую определяют снижение их устойчивости к механическим нагрузкам, что подтверждается результатами определения прочности исследуемых материалов при приложении изгибающей нагрузки. Критерием оценки устойчивости является показатель деформации растрескивания $\epsilon_{\text{раст}}$.

Проведенные исследования влияния устойчивости исследуемых полимеров к агрессивной среде (1 %-ный раствор H_2SO_4) показали:

- при одновременном воздействии на исследуемые материалы механических напряжений и кислой среды результат зависит от сравнительной интенсивности и связан с характером действия каждого из этих факторов;

- краткосрочное воздействие кислотного раствора на образцы ПП, ПЭВД, ПЭНД не приводит к изменению их свойств в результате высокой степени кристалличности исследуемых материалов;

- изменение массы образцов характеризуется разностью скорости протекания диффузионных процессов и скорости химической деструкции полимера;

- наибольшей устойчивостью к воздействию щелочной среды из трех исследуемых материалов обладает полиэтилен высокого давления. Так при зафиксированном изменении

массы ПП (+0,01 %) уже на второй неделе эксперимента и ПЭНД (-0,01 %) на четвертой неделе изменение массы ПЭВД было зафиксировано на 16-й неделе эксперимента и составило +0,01 %;

- наименьшей устойчивостью к воздействию агрессивных щелочных сред обладает полипропилен, что подтверждается результатами исследования растрескивания испытуемых материалов. К концу 16-й недели показатель деформации растрескивания образцов полипропилена составил $\epsilon_{\text{растрПП}} = 3,853 \times 10^{-3}$, когда значения для ПЭВД и ПЭНД составили соответственно $0,11 \times 10^{-3}$ и $1,495 \times 10^{-3}$;

- покрытие на основе ПЭВД удовлетворяет технологическим особенностям складирования агрессивных отходов.

При формировании предлагаемого покрытия следует учитывать влияние отрицательных температур на материалы, входящие в его состав, обусловленное географическим расположением хранилищ отходов.

Исследования влияния отрицательных температур на прочностные характеристики полимерных материалов проводились с использованием маятникового копера ИТ 504. Копер ИТ 504 представляет собой исследовательский прибор для определения ударной вязкости по Изоду и Шарпи. Охлаждение исследуемых образцов ПП, ПЭВД, ПЭНД происходит за счет газообразного азота, получающегося при испарении жидкого азота. Образцы подвергались ударной нагрузке при различных температурах в диапазоне от -30 до 60 °С с рабочим шагом 10 °С. В ходе эксперимента определялись значения ударной вязкости, т.е. фактически определялась хрупкость исследуемых образцов при различных температурах.

Из приведенной графической зависимости (рис.2) видно, что образцы ПП обладают наименьшими показателями ударной вязкости. Такое поведение материала определяется высоким значением плотности испытуемого материала. Разрушение образцов ПП отмечается во всем диапазоне испытаний, с низким показателем ударной вязкости от $2,8 \pm 0,014$ кДж/м² при температуре -30 °С до $12,1 \pm 0,061$ кДж/м² при 60 °С. Разрушение ПЭВД в диапазоне температур от 10 до 60 °С не наблюдается, разрушение образцов отмечается при нулевом значении температуры с относительно высоким показателем ударной вязкости $35,4 \pm 0,177$ кДж/м². При последующем изменении температуры испытания образцов до -30 °С ударная вязкость ПЭВД изменяется незначительно. В результате испытания образцов ПЭНД также отмечается диапазон температур 30-60 °С, в котором не происходит разрушение образцов. С понижением температуры от 30 °С до нижней температурной границы испытания -30 °С образцы ПЭНД разрушаются в интервале значений ударной вязкости 26,4-25,6 кДж/м² с погрешностью измерения $\pm 0,5$ %.

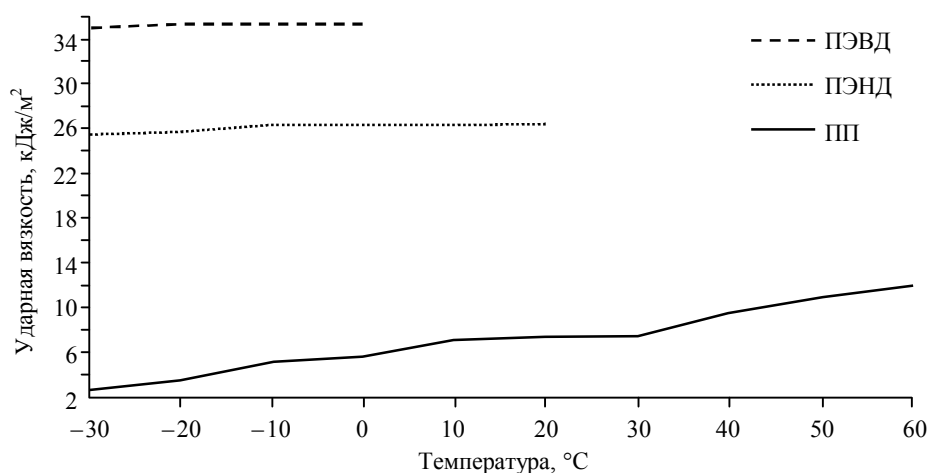


Рис.2. Зависимость изменения ударной вязкости образцов полимерных материалов от температуры

Таким образом, в результате проведенного комплекса исследований было доказано, что наиболее пригодными материалами для формирования гидроизоляционного покрытия при консервации техногенных месторождений в условиях различных регионов Российской Федерации (в том числе условий Крайнего Севера) являются полиэтилены высокой и низкой плотности. Полипропилен как изоляционный материал имеет повышенную хрупкость, которая увеличивается с понижением температуры, что является недопустимым в сложных климатических условиях.

Дальнейшие исследования полимерных покрытий для изоляции техногенных месторождений будут посвящены повышению надежности экранирования месторождений внесением модификаторов в рецептуру полимерных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.А. Формирование современного геохимического облика почв и использование отходов промышленного производства // Экологический вестник Северного Кавказа. 2015. Т.11. № 1. С.4-19.
2. Гальперин А.М. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов. Том 1. Насыпные и намывные массивы / А.М.Гальперин, В.Форстер, Х.Ю.Шеф. М.: Изд-во Московского государственного горного ун-та. 2006. 392 с.
3. Глебов В.Д. Расчет толщины пленочных полимерных противодиффузионных экранов / В.Д.Глебов, В.П.Лысенко // Гидротехническое строительство. 1979. № 6. С.17-20.
4. Патент № RU2547869. Способ консервации и изоляции техногенных месторождений / М.А.Пашкевич, Ю.Д.Смирнов, Т.А.Петрова, А.Е.Исаков, Д.О.Акименко. Опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
5. Пашкевич М.А. Разработка технологии изоляции при подготовке площадок кучного выщелачивания / М.А.Пашкевич, Д.О.Акименко // Записки Горного института. 2013. Т.203. С.75-79.
6. Alekseenko V., Alekseenko A. The abundances of chemical elements in urban soils // Journal of Geochemical Exploration. 2014. № 147 (B), p.245-249.
7. Eyerer P., Gettwert V. Properties of Plastics in Structural Components / Polymers – Opportunities and Risks I. Springer Verlag. 2010. p.47-165.
8. Greenwood N.N., Earnshaw A. Chemistry of the Elements. 2nd Edition. Butterworth-Heinemann. 1997. p.1600.
9. Rechar R.P. Historical background on performance assessment for the Waste Isolation Pilot Plant // Reliability Engineering & System Safety. 2000. Vol.69. N 1-3, p.5-46.
10. Simpson H.E. Artificial deposits and modified land Encyclopedia of Earth Science. General Geology. Springer US. 1988, p.21-25.

REFERENCES

1. Alexeenko V.A. Formirovanie sovremennoogo geohimicheskogo oblika pochv i ispol'zovanie othodov promyshlennogo proizvodstva (*Formation of the modern geochemical look of soils and usage of industrial wastes*). Jekologicheskij vestnik Severnogo Kavkaza. 2015. Vol.11. N 1, p.4-19.
2. Gal'perin A.M., Forster V., Chief H.Yu. Tehnogennye massivy i ohrana prirodnyh resursov. Tom 1. Nasyppnye i namynnye massivy (*Technogenic massifs and protection of natural resources. Vol.1. Bulk and alluvial massifs*). Moscow: Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo un-ta. 2006, p.392.
3. Glebov V.D., Lysenko V.P. Raschet tolshhiny plenochnyh polimernyh protivodif'fuzionnyh jekranov (*Calculation of the thickness of polymer film impervious screens*). Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. 1979. N 6, p.17-20.
4. Patent N RU2547869. Sposob konservacii i izoljicii tehnogennyh mestorozhdenij (*Method of preservation and isolation of anthropogenic deposits*). M.A.Pashkevich, Ju.D.Smirnov, T.A.Petrova, A.E.Isakov, D.O.Akimenko. Date of publication 10.04.2015. Bull. N 10.
5. Pashkevich M.A., Akimenko D.O. Razrabotka tehnologii izoljicii pri podgotovke ploshhadok kuchnogo vyshhelachivaniya (*Development of isolation technology in preparation of heap leach pads*). Zapiski Gornogo instituta. 2013. Vol.203, p.75-79.
6. Alekseenko V., Alekseenko A. The abundances of chemical elements in urban soils. Journal of Geochemical Exploration. 2014. N 147(B), p.245-249.
7. Eyerer P., Gettwert V. Properties of Plastics in Structural Components. Polymers – Opportunities and Risks I. Springer Verlag. 2010, p.47-165.
8. Greenwood N.N., Earnshaw A. Chemistry of the Elements. 2nd Edition. Butterworth-Heinemann. 1997. p.1600.
9. Rechar R.P. Historical background on performance assessment for the Waste Isolation Pilot Plant. Reliability Engineering & System Safety. 2000. Vol.69. N 1-3, p.5-46.
10. Simpson H.E. Artificial deposits and modified land Encyclopedia of Earth Science. General Geology. Springer US. 1988, p.21-25.

ENVIRONMENTALLY SAFE METHODS OF TECHNOGENIC DEPOSITS CONSERVATION

M.A.PASHKEVICH, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, mpash@spmi.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The results of monitoring and evaluating the negative impact caused by waste storage (technogenic deposits) of the mineral resource sector are presented. The research findings on the development of environmentally sound and cost-effective ways of technogenic deposits conservation are given. The method is based on the formation of screens made of polymeric materials sintered with soil. As a result of laboratory studies and experiments on test sites the optimal technology of the screen formation was selected.

Key words: technogenic deposits, technogenic massifs, wastes of the mineral resource sector, conservation of waste storage and disposal sites, screens made of polymeric materials sintered with soil.

Геоэкономика и менеджмент

Geoeconomics and management

УДК 338.532:622.323

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА МИРОВОМ РЫНКЕ ЦЕН НА НЕФТЬ И ГАЗ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

В.А.ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук, профессор, *lebedev_va@spti.ru*

Б.И.СПЕСИВЦЕВ, канд. техн. наук, доцент, *bspes1@gmail.com*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена поиску формального признака наступления кризисных явлений в мировой экономике, связанных с финансовым и нефтегазовым рынками. В данной работе для прогнозирования кризисных явлений на финансовом рынке и, как следствие, на рынке топлива используется теория «Джокеров и Русел». В соответствии с теорией рынок разбивается на предсказуемые и непредсказуемые периоды. Для анализа временных рядов котировок валют и цен на нефть и газ используются методы корреляционного анализа. В работе построены временные зависимости годовых коэффициентов корреляции Пирсона между рядами котировок ведущих мировых валют с 1999 по 2013 г. Сильная корреляция между ценами на нефть и курсом доллара позволяет сделать предположение о возможности определения кризисных явлений на рынке нефти, а сильная связь между ценами на нефть и газ – и на рынке сжиженного газа. По результатам корреляционного анализа определяется период Джокера, при этом общепринятый период кризиса входит в него с некоторым запаздыванием.

Таким образом, фактически мировой кризис начинается раньше общепринятого срока и определяется периодом Джокера.

Ключевые слова: цены на нефть и газ; временные ряды котировок валют и цен на нефть и газ; теория «Джокеров и Русел»; иерархический кластерный анализ; коэффициент корреляции; прогнозирование кризисов.

Поскольку на причины возникновения финансового кризиса 2008 г. нет единой точки зрения [1, 3, 5, 6, 10, 11], мы постарались разработать такой подход, который опирался бы на объективную информацию. В данном случае это временные ряды котировок валют, нефти и сжиженного газа.

Очевидно, что мировая экономика представляет собой очень сложную многопараметрическую систему, в которой одновременно действуют противоположные тенденции. Для описания такой системы подходит теория «Джокеров и Русел», предложенная в работе [7]. В соответствии с этой теорией существуют такие периоды времени, когда сложные системы ведут себя предсказуемым образом (Русла) и для их описания требуется небольшое число параметров. Периоды непредсказуемого поведения системы называются Джокерами.

Основной проблемой использования предлагаемого аппарата (теории «Русел и Джокеров») является определение математических конструкций, которые позволили бы определять периоды Джокеров и Русел. Выход из создавшегося положения видится в использова-

нии подходов, разработанных в квантовой физике для описания статистических и вероятностных явлений. Например, для описания рассеяния электронов на дифракционной решетке используются абстрактные математические конструкции, такие как волновая функция. При этом экспериментально определяется не сама волновая функция, а ее квадрат как вероятность нахождения частицы в данной точке пространства [2].

Следуя такому подходу, можно попытаться найти соответствующие математические конструкции и для описания периода кризиса мировой финансовой системы.

При этом был ясен временной период, в течение которого эта конструкция должна значительно меняться. Это 3-4 года, так как считается, что мировой кризис продолжался с 2008 по 2011 г.

В качестве такой конструкции были предложены временные ряды годовых парных коэффициентов корреляции Пирсона между основными мировыми валютами, к которым далее был применен аппарат иерархического кластерного анализа [8].

В общем случае, сам по себе факт корреляционной зависимости между рядами котировок не дает основания утверждать, что один из них предшествует или является причиной изменений другого. Кроме того, они вообще могут быть причинно не связаны между собой, а зависеть от действия третьего фактора. Однако можно пытаться выявить структуру взаимосвязи между этими рядами и на основании этой структуры делать заключение о поведении финансовой системы [4]. Поэтому в нашем случае для анализа временного развития мировой экономики в первую очередь важно взаимное расположение полученных рядов годовых парных коэффициентов корреляции котировок мировых валют.

На первом этапе строятся временные зависимости годовых коэффициентов корреляции между рядами котировок ведущих мировых валют с 1998 по 2013 г.

При этом анализировались годовые временные ряды котировок валют (японская иена, доллар США, евро, британский фунт, швейцарский франк, китайский юань) по отношению к рублю, взятые на сайте Центрального банка РФ [13] (рис.1, а) и на сайте Центрально-Европейского банка [14] (рис.1, б). Парные коэффициенты корреляции этих рядов по отношению к доллару США рассчитывались по формуле Пирсона:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i – значение динамического ряда (например, USD/RUR) от $i = 1$ до $n = 250$; \bar{x} – среднее арифметическое из значений первого динамического ряда; y_i – значение второго динамического ряда (например, EURO/RUR) \bar{y} – среднее арифметическое из значений второго временного ряда.

В соответствии с математической конструкцией коэффициент корреляции колеблется между -1 и $+1$.

На рис.1 показаны временные зависимости годовых коэффициентов корреляции основных мировых валют за указанный период, при этом каждая точка ряда содержит результат обработки примерно 500 котировок в двух временных рядах соответствующих валют. За период с 1998 по 2013 г. каждая кривая содержит результат обработки 3750 котировок. Такое сжатие информации аналогично переходу от мелкого масштаба к более крупному во фрактальном анализе [7], что делает более наглядным основные тенденции в изучаемой системе.

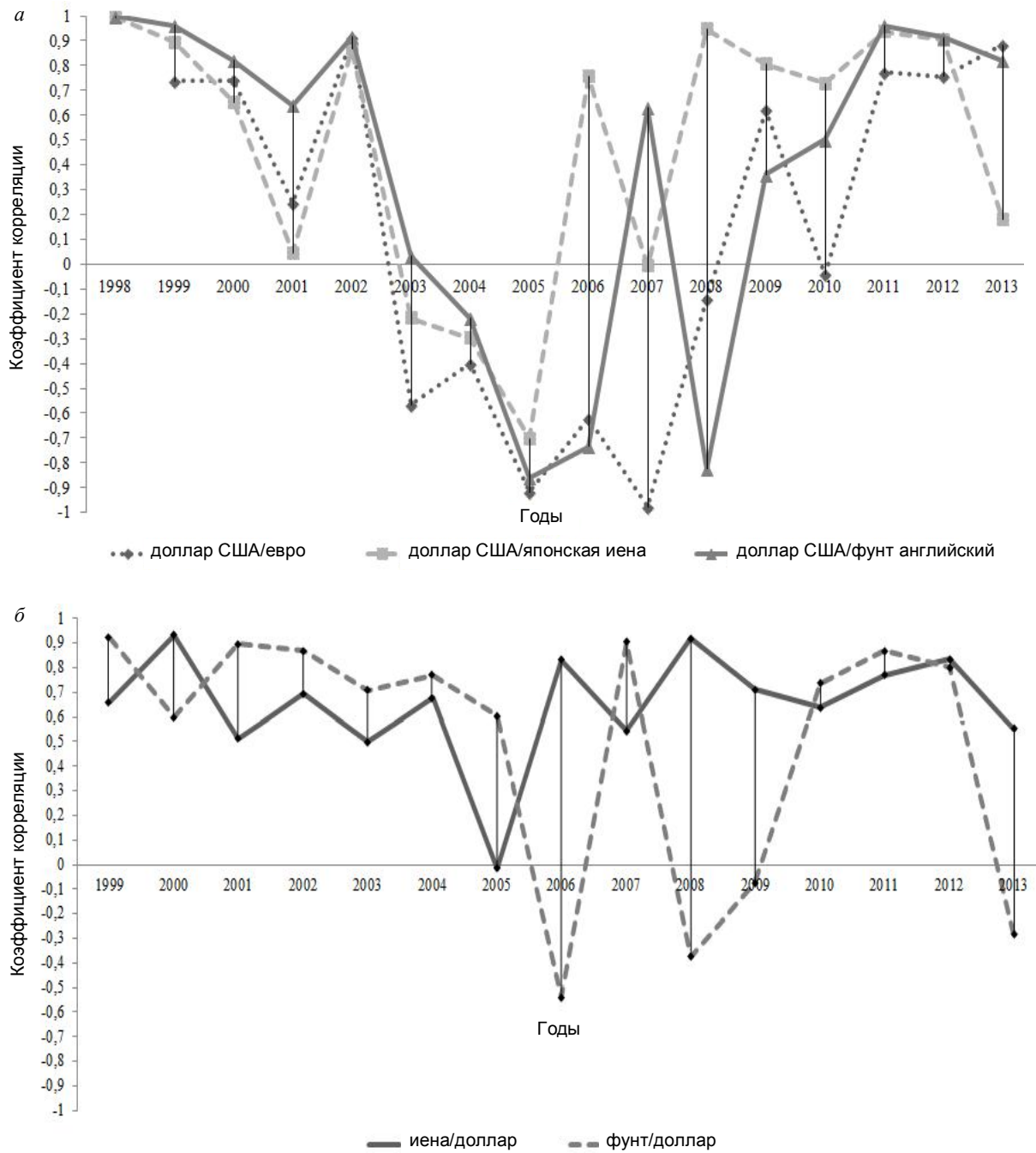


Рис. 1. Временная зависимость годовых коэффициентов корреляции между рядами котировок ведущих мировых валют по данным Центрального банка РФ (а) и Центрально-Европейского банка (б)

Полученные результаты являются хорошей иллюстрацией к теории «Джокеров и Русел» [7]. В соответствии с этой теорией существуют такие периоды времени, когда сложные системы ведут себя предсказуемым образом (Русла) и для их описания требуется небольшое число параметров. На рис.1 такими отрезками являются периоды с 1999 по 2005 г. и с 2010 по 2012 г. В эти периоды валюты изменяются синхронно. Отрезок с 2006 по 2009 г. показывает непредсказуемый характер изменения валют (Джокер). В это время поведение мировой финансовой системы не может быть спрогнозировано, поскольку на нее влияет большое число противоречивых факторов. На этот период приходится мировой фи-

нансовый кризис (2008-2009 г.). Однако видно (рис.1), что период Джокера начался значительно раньше, примерно с 2006 г.

Период Джокера начинается раньше кризиса на год-полтора и тем самым такое поведение данных временных рядов может предсказывать возможность кризиса. Проверку этого утверждения можно будет сделать при анализе следующего кризиса.

На втором этапе исследования применяется иерархический кластерный анализ для построения дендрограмм по методу дальней связи. При построении матрицы сходства годовые коэффициенты корреляции ρ были заменены на индексы d по формуле $d = (2(1 - \rho))^{0,5}$ [12]. Такая замена позволяет избежать отрицательных величин. По полученным матрицам сходства строятся дендродрамы по методу дальней связи [8], которые позволяют определять максимальные расстояния Z_{\max} между кластерами.

Таким образом были обработаны ряды годовых котировок валют к рублю за период с 2004 по 2013 г. На основе дендрограмм строится временная зависимость максимального расстояния между кластерами Z_{\max} (рис.2). Как видно из рисунка, на период Джокера приходится максимум этой зависимости. Увеличение функции Z_{\max} в 2013 г. может свидетельствовать о начале нового кризисного цикла.

Рассмотрим взаимосвязь нефтяного, газового и финансового рынков. В последние годы цены на мировом рынке на топливо (газ и нефть) сильно коррелируют с курсом доллара, в частности, с валютной парой евро/доллар и Broad Dollar Index .

Это явление объясняется тем, что с 2000 г. нефть начинает играть роль инструмента защиты от обесценивания доллара [9].

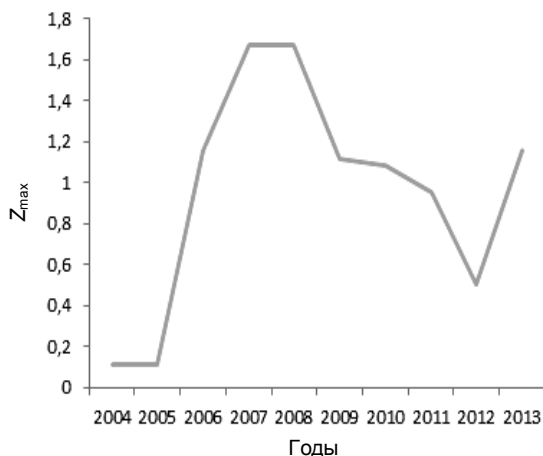


Рис.2. Временная зависимость максимального расстояния между кластерами Z_{\max} по годам

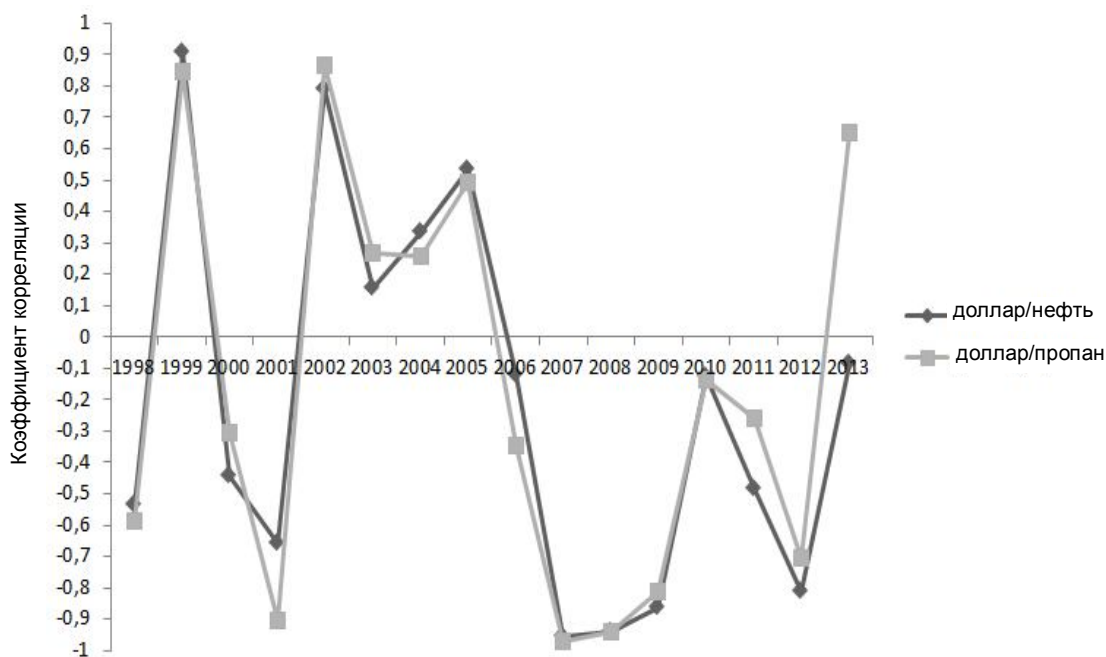


Рис.3. Сравнение временной зависимости годовых парных коэффициентов корреляции долларовых котировок нефти и сжиженного пропана

Такая корреляция открывает новые возможности для прогнозирования ее цены.

На рис.3 показана сильная взаимосвязь между ценами на нефть и сжиженным пропаном. Данные котировок нефти и газа взяты на сайте US Energy Information Administration [15].

Отмеченная в ряде работ сильная корреляция между ценами на нефть и курсом доллара, позволяет сделать предположение о возможности определения кризисных явлений на рынке нефти, а сильная связь между ценами на нефть и газ (рис.3) – и на рынке сжиженного газа.

Сравнение рис.1-3 показало: минимум (рис.3) приходится на период Джокера (рис.1) и максимум на период Z_{\max} (рис.2). Таким образом, фактически мировой кризис начинается раньше общепринятого срока и определяется периодом Джокера.

Выводы

1. Временные зависимости годовых коэффициентов корреляции между рядами валют и рядами цен на топливо можно использовать для определения периодов Русел и Джокеров в мировой экономике.

2. Показано, что период финансового кризиса входит в период Джокера на графиках временных зависимостей: годовых парных коэффициентов корреляции мировых валют, максимального расстояния между кластерами Z_{\max} на дендрограммах, построенных по методу «дальней связи», годовых коэффициентов корреляции котировок нефти и газа по отношению к котировкам доллара в евро.

3. Период Джокера начинается раньше финансового кризиса на год-полтора и тем самым такое поведение валют может предсказывать возможность кризиса.

4. Сильная корреляция между ценами на нефть и курсом доллара позволяет сделать предположение о возможности определения кризисных явлений на рынке нефти, а сильная связь между ценами на нефть и на газ – и на рынке сжиженного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аганбегян А.Г. Об особенностях современного мирового финансового кризиса и его последствий для России // Деньги и кредит. 2008. № 12. С.1-9.
2. Бом Д. Квантовая теория. М.: Наука, 1965. 729 с.
3. Вахитов Д.Р. Анализ причин кризиса 2008 года и направления развития экономической ситуации / Режим доступа: www.tisbi.ru/assets/Site/Science/--2014/2008.pdf.
4. Возможность прогнозирования кризисных явлений на мировом рынке цен на нефть и газ / В.С.Дресвянкин, В.А.Лебедев, О.Б.Онопко, Б.И.Спесивцев, И.И.Шубина // Сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. «Энергоэффективность энергетического оборудования»; Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2014. 250 с.
5. Глазьев С. От деградации к развитию // Аргументы недели. 2013. № 31. С.12-13.
6. Зомбанакис М.А. Причины и последствия мирового финансового кризиса. М.: Изд-во УРСС, 2009. 32 с.
7. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г.Малинецкий, А.Б.Потапов. М.: Изд-во УРСС, 2000. 336 с.
8. Многомерный статистический анализ в экономике / Л.А.Сошникова, В.Н.Тамашевич, Г.Уебе, М.Шефер. М.: Юнити-Дана, 1999. 598 с.
9. Молачиев А. Мировые цены на нефть: без стабильности // Нефтегазовая вертикаль. 2011. N 15-16. С.90-94.
10. Цветков В.А. Причины, развитие и последствия экономического кризиса для России // Международная экономика. 2010. № 3. С.5-12.
11. Шаронов В.В. Мировой финансово-экономический кризис: причины и последствия // Ярославский педагогический вестник. 2009. № 2 (59). С.228-232.
12. Bonanao G. Taxonomy of stork market indices / G.Bonanao, N.Vandewalle, R.N.Montegna // Physical review E. 2000. Vol.62. N 6. P.7615-7618.
13. http://www.cbr.ru/currency_base/dynamics.aspx
14. <http://onsho.mvrwe.mv2xe33qmexgk5i.nblu.ru/browse.do?node=2018794>
15. http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm

REFERENCES

1. *Aganbegyan A.G.* Ob osobennostyakh sovremennogo mirovogo finansovogo krizisa i ego posledstviy dlya Rossii (*On the features of today's global financial crisis and its consequences for Russia*). Den'gi i kredit. 2008. Vol. 12, p.1-9.
2. *Bom D.* Kvantovaya teoriya (*Quantum theory*). Moscow: Nauka, 1965, p.729.
3. *Vakhitov D.R.* Analiz prichin krizisa 2008 goda i napravleniya razvitiya ekonomicheskoi situatsii (*Analysis of causes of the 2008 crisis and lines of development of the economic situation*). Rezhim dostupa: www.tisbi.ru/assets/Site/Science/--2014/2008.pdf.
4. *Dresvyankin V.S., Lebedev V.A., Onopko O.B., Spesivtsev B.I., Shubina I.I.* Vozmozhnost' prognozirovaniya krizisnykh yavlenii na mirovom rynke tsen na neft' i gaz (The possibility to predict the oil and gas price crisis in the world market) // Sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Energoeffektivnost' energeticheskogo oborudovaniya». St Petersburg, 2014, p.250.
5. *Glaz'ev S.* Ot degradatsii k razvitiyu (*From degradation to development*). Argumenty nedeli. 2013. N 31, p.12-13.
6. *Zombanakis M.A.* Prichiny i posledstviya mirovogo finansovogo krizisa (*Causes and consequences of the global financial crisis*) Moscow: Izd-vo URSS, 2009, p.32.
7. *Malinetskii G.G., Potapov A.B.* Sovremennyye problemy nelineinoi dinamiki (*Modern problems of nonlinear dynamics*). Moscow: Izd-vo URSS, 2000, p.336.
8. *Soshnikova L.A., Tamashevich V.N., Uebe G., Shefer M.* Mnogomernyi statisticheskii analiz v ekonomike (*Multivariate statistical analysis in Economics*). Moscow: Yuniti-Dana, 1999. p.598.
9. *Molachiev A.* Mirovye tseny na neft': bez stabil'nosti (*World oil prices: without stability*). Neftegazovaya vertikal'. 2011. N 15-16, p.90-94.
10. *Tsvetkov V.A.* Prichiny, razvitie i posledstviya ekonomicheskogo krizisa dlya Rossii (*The causes, development and consequences of the economic crisis for Russia*). Mezhdunarodnaya ekonomika. 2010. N 3, p.5-12.
11. *Sharonov V.V.* Mirovoi finansovo-ekonomicheskii krizis: prichiny i posledstviya (*The global financial and economic crisis: causes and consequences*) Yaroslavskii pedago-gicheskii vestnik. 2009. N 2 (59), p.228-232.
12. *Bonanao G., Vandewalle N., Montegna R.N.* Taxonomy of stork market indices. Physical review E. 2000. Vol.62. N 6, p.7615-7618.
13. http://www.cbr.ru/currency_base/dynamics.aspx
14. <http://onsho.mvrwe.mv2xe33qmexgk5i.nblu.ru/browse.do?node=2018794>
15. http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm

THE POSSIBILITY TO PREDICT THE OIL AND GAS PRICE CRISIS IN THE WORLD MARKET ON THE BASIS OF THE CORRELATION ANALYSIS

V.A.LEBEDEV, PhD in Engineering Sciences, Professor, lebedev_va@spmi.ru

B.I.SPESIVTSEV, PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, bspes1@gmail.com
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article is devoted to the search for the formal signs of the onset of crisis phenomena in the global economy related to the financial and oil and gas markets. To predict the crisis in the financial market and, as a consequence, the fuel market, the theory of «Jokers and Channels» is used in this paper. In accordance with the theory, the market is divided into predictable and unpredictable periods. Methods of the correlation analysis are used to analyze time series of exchange rates and oil and gas prices. In this paper, the authors construct the time dependence of the annual Pearson correlation coefficients between the ranks of quotes of the world leading currencies over the period from 1999 to 2013. A strong correlation between oil prices and the dollar exchange rate leads to the suggestion of identifying the crisis phenomena in the oil market, and due to the strong link between oil and gas prices, in the liquefied gas market. According to the results of the correlation analysis, the «Joker» period is determined and the conventional period of crisis enters it with some delay.

Thus, based on the research the authors can conclude that, in fact, the global crisis starts earlier than the generally accepted term and is determined by the Joker period.

Key words: oil and gas prices; the time series of currency rates and oil and gas prices; the theory «Jokers and Channels»; hierarchical cluster analysis; correlation coefficient; prediction of crises.

СФЕРА НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ В КОНТЕКСТЕ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

М.М.ХАЙКИН, *д-р экон. наук, профессор, marcmix.spb@gmail.com*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается сущность экономической системы сферы недропользования: ее содержание, элементы; особенности в условиях смешанной экономики. Особый акцент делается на эволюцию экономической теории и роль государства как основного регулятора деятельности всех хозяйствующих субъектов, работающих в сфере минерально-сырьевого комплекса и его инфраструктуры. Показана роль современной экономической теории как науки в разработке и обосновании принципов функционирования территориально-экономической системы недропользования как в общетеоретическом плане, так и с практической точки зрения.

Ключевые слова: экономическая система, экономическая теория, сфера недропользования.

Экономическая система сферы недропользования – это исторически сложившаяся в стране и законодательно закреплённая, действующая в сфере недропользования совокупность принципов, правил, норм, определяющих форму и содержание основных экономических отношений субъектов, возникающих в процессе производства, распределения, обмена и потребления экономического продукта, полученного из недр земли. В практическом отношении она представляет собой особым образом упорядоченную систему связей между субъектами хозяйствования, которые непосредственно или опосредованно обеспечивают производство, распределение, обмен и потребление ресурсов, естественным образом находящихся в недрах земли.

Функционирование экономической системы недропользования должно быть нацелено на выполнение важнейших социально-экономических задач общества:

- обеспечение экономического роста всех субъектов недропользования;
- координацию всех видов хозяйственной деятельности в сфере недропользования;
- создание благоприятных социально-экономических условий, способствующих росту качества жизни в стране и регионе, соответствие не только содержанию проводимой в стране промышленной политике, но и создание благоприятных условий для реализации социальных целей всей национальной экономики.

Важной характеристикой экономической системы сферы недропользования является то, что она охватывает всю совокупность экономических отношений, возникающих в процессе взаимодействия человека с ресурсами земли по поводу преобразования их в элементы жизнедеятельности. Именно поэтому функционирование сферы недропользования связано с постановкой многих социальных проблем общества, и при этом проблем не только экономического характера.

Общеизвестно, что именно сфера недропользования создает самую значительную часть средств на уровне всей страны. Но в этой связи возникает вполне уместный вопрос: насколько эффективно и справедливо эти средства используются. Трудно не согласиться с членом экспертной группы «Новая модель экономического роста. Обеспечение макроэкономической и социальной стабильности» по обновлению «Стратегии – 2020» академиком С.А.Киммельманом, который пишет, что отраслевому экономисту, исследующему экономику недропользования видны ошибочные экономико-политические решения по поводу изъятия и присвоения огромной массы горной и ценовой ренты в сырьевом секторе эконо-

мики России. Последние 20 лет характеризуются массовым присвоением основной массы ренты олигархами, представителями властной верхушки, чиновниками и их родственниками. Гражданское общество и каждый гражданин не имели и не имеют доступа к ценовой и горной ренте, хотя каждый (от мала до велика) имеет право на частичку ренты, возникающей при эксплуатации участков недр, являющихся по Конституции РФ государственной общественной (общенародной) собственностью» [6]. Мы разделяем точку зрения, в соответствии с которой «узким местом», критическим фактором функционирования сложившейся системы общественного воспроизводства в России является масштабное расширение практики рентоориентированного поведения экономико-политических акторов, превращение государства (как социально-политического института) в защитника сложившейся модели развития страны, следствием чего является отсутствие системного подхода к решению социально-экономических проблем, имитация модернизационных процессов в реальной хозяйственной практике» [2]. Стоит согласиться с мнением заведующего сектором Института экономики и организации промышленного производства СО РАН В.Крюкова, в соответствии с которым либеральная система институтов в сфере отношений собственности, регулирующая хозяйственный оборот обычных активов, должна быть дополнена разветвленной системой норм, правил и процедур, жестко регламентирующих использование ресурсов недр. Государство обеспечивает защиту своих прав как их собственника и формирует условия и предпосылки, для того чтобы процессы освоения и использования невозобновляемых полезных ископаемых отвечали общественным интересам. Современная ситуация в сфере недропользования в России, напротив, служит иллюстрацией того, к чему может привести неполнота системы базовых и комплементарных институтов, определяющих нормы, правила и процедуры вовлечения ресурсов недр в хозяйственный оборот. В результате в процессе освоения и использования минерально-сырьевых ресурсов до настоящего времени учитываются интересы не столько общества, сколько владельцев контрольных пакетов компаний-недропользователей [7].

С другой стороны, весьма высока роль социальных факторов в динамике инновационного развития сферы недропользования. Не меняя сущностной природы экономической системы недропользования, в процессе ее развития в принципе трансформируется ее содержание: меняются как количественные и качественные характеристики хозяйствующих субъектов – элементов системы, так и содержание и формы взаимодействий между ними.

В хозяйственной системе сферы недропользования протекают не только экономические процессы, основанные на сложившихся в соответствующих отраслях недропользования отношений собственности. В рамках этой системы протекают как организационно-управленческие процессы, основанные на многообразии и развитии различных организационно-правовых форм хозяйствования субъектов сферы недропользования, так и непосредственно производственные процессы, обеспечивающие добычу, обогащение, транспортировку и т.п. ресурсов земли. Поэтому, с нашей точки зрения, экономическая система сферы недропользования – это лишь составляющая (и при этом очень важная ее часть) комплексной хозяйственной системы сферы недропользования. Результаты направлений исследований последних, более чем двух десятилетий подтверждают тот факт, что на практике не существует чисто экономических (и тем более финансовых) механизмов недропользования: есть механизмы организационно-экономические, организационно-управленческие, экономико-управленческие и т.д.

Хозяйственная система сферы недропользования – это эко-социоэкономическая система. Реализация ее экономических целей не может и не должна осуществляться вне решения экологических и социальных задач. Однако эти задачи нередко связаны с реализацией тех или иных видов неэкономической эффективности, которые в ряде случаев вступают в противоречие с традиционными общепризнанными критериями экономической эффективности. При этом текущая деятельность того или иного субъекта хозяйствования или его

проектное управление по своей природе являются неприбыльными или даже убыточными. Поэтому оценка эффективности функционирования экономической системы сферы недропользования только с позиции критериев прибыльности и рентабельности, на наш взгляд, не учитывает полезности многих видов той инфраструктурной деятельности, которая создает необходимые условия для ее нормального функционирования. В свою очередь, надежно работающая система обеспечения основной деятельности необходима для эффективной работы основных производственных подразделений компаний-недропользователей, их экономической эффективности как необходимого условия экономического роста не только на микроуровне, но и роста качества жизни в соответствующем регионе и стране в целом, на всех уровнях управления экономикой.

Функционирование экономической системы сферы недропользования есть совокупность взаимодействий ее элементов – хозяйствующих субъектов, связанных друг с другом определенными отношениями, центральное место среди которых занимают финансово-правовые отношения. При этом формы собственности взаимодействующих субъектов хозяйствования могут быть различные. Их сосуществование есть основа развития различных организационно-экономических форм государственно-частного партнерства.

В условиях действия общих закономерностей глобализации и интеграции мировой экономики законы функционирования экономической системы недропользования выходят из ее внутренней среды за пределы системы. С этих позиций вопросы, связанные с функционированием внутреннего рынка территориально-экономической системы недропользования, уходят на второй план. Малый и средний бизнес сферы недропользования по объективным причинам занимает слишком скромные позиции, работа же транснациональных корпораций не способна замыкаться на жестких рамках соответствующей территории. Поэтому для недропользования в большей степени характерны межстрановые и межрегиональные взаимодействия, основанные, главным образом, на товарно-денежных отношениях. Внутренний же рынок в рамках территориально-экономической системы недропользования в качестве замкнутой системы в реальности имеет минимальную емкость, а в ряде случаев практически не существует.

С другой стороны, в национальной экономике существует большое количество регионов с ярко выраженной сырьевой специализацией, среди них моногорода и поселки городского типа, инфраструктура которых непосредственно зависит от характера работы одного или двух градообразующих предприятий. Но и в этом случае финансовое обеспечение муниципальной, социальной инфраструктуры соответствующей территории осуществляется, главным образом, на основе межстрановых и межрегиональных взаимодействий, которые могут носить, как межотраслевой, так и внутриотраслевой характер.

Современная экономическая теория оставляет за собой разработку и обоснование принципов функционирования территориально-экономической системы недропользования. Практическая значимость этой работы заключается, во-первых, в оценке места рынка в этой системе наряду с существующими областями ослабленного и абсолютно отсутствующего рынка для идентификации форм и рамок действия экономических законов; во-вторых, оценке места и роли государства в этой системе на всех уровнях государственного управления; в третьих, в оценке эффективности функционирования предприятий сферы недропользования с точки зрения их влияния на развитие территории и страны в целом.

Результаты экономических исследований показывают, что рост экспортных цен на продукцию минерально-сырьевого комплекса, с одной стороны, создает благоприятную почву для роста как его доходов, так и регионов и страны в целом. С другой стороны, он «вымывает» ресурсы из территориально-экономической системы недропользования как замкнутой системы» и, таким образом, снижает деловую активность многих отечественных предприятий. Однако это имеет место не всегда. По результатам еще более глобальных исследований следует отметить, что внутренние и внешние взаимодействия могут

вести себя тройким образом: доминировать друг над другом, конкурировать друг с другом, поддерживать друг друга. Все эти взаимодействия, как правило, носят потоковую природу. Поэтому в ряде случаев речь может идти не об отдельных взаимодействиях, а потоках взаимодействий.

На основе анализа ключевых детерминантов современного развития экономических систем и экономической системы недропользования, в частности, можно сделать вывод о том, что исследование экономической системы недропользования должно основываться на интеграции тесно взаимосвязанных политэкономического и институционального подходов. Осмысление последнего положения связано с пониманием содержания процессов эволюции экономической науки в долгосрочной исторической ретроспективе.

В формировании и развитии экономической науки в основном можно выделить четыре стадии:

- до XVIII в. – развитие экономических знаний во внеаучных рамках;
- середина XVIII в. – первые две трети XIX в. – рождение экономической науки. Ее основоположники – представители буржуазной политической экономии А.Смит [10] и Д.Рикардо [9];
- последняя треть XIX в. – первая треть XX в. – определение концептуальных базовых принципов экономической науки. Условно эта стадия может идентифицироваться с момента издания фундаментальной работы К.Маркса «Капитал» и известных работ А.Маршалла по политической экономии до начала становления кейнсианского направления в экономической науке [5, 8];
- со второй трети XX в. по настоящее время – современное развитие экономической науки.

Современный этап развития мировой экономической теории характеризуется совокупностью экономических школ, которые можно представить следующими группами.

1. Неоклассическое направление экономической теории: теория неоклассического синтеза [17]; модель общего экономического равновесия Эрроу – Дебрё [13]; теорема невозможности К.-Дж.Эрроу [16]; теория соотношения факторов производства (теория Хекшера – Олина); концепция дуалистической экономики с избытком рабочей силы (модель В.А.Льюиса); теория промышленной организации [11].

2. Неокейнсианское направление экономической теории: теория экономического роста (теория Д.Робинсона); теория неравномерных толчков (теория Р.-А.-К.Фриша); теория спроса; теория жизненного цикла (теория Херси и Бланшара); метод издержки – выпуск (модель В.Леонтьева); теория оптимального распределения ресурсов (теория Л.Канторовича); общеравновесная модель торговли (модель Дж.-Э.Мида); теория инвестиций q (коэффициент Тобина q); модель ЛИНК (модель Л.-Р.Клейна); модель рынков с асимметричной информацией (теории Дж.Ейкерлофа, М.Спенса, Дж.-Ю.Стиглица).

3. Неоинституционализм как направление экономической теории: шведская (стокгольмская) школа макроэкономики; новая институциональная экономическая теория (НИЭТ); базовая теория экономической политики; теория общественного выбора; теория человеческого капитала; теория оптимальных валютных зон; современная теория портфельных инвестиций; теория стоимости капитала Модильяни – Миллера; анализ экономического управления, в особенности границ фирмы.

4. Неолиберализм как направление экономической теории: концепция спонтанного характера рыночного порядка; теория экономики рынков; монетарная концепция; теория рациональных ожиданий; концепция непоследовательности политики во времени.

5. Поведенческая экономика как направление экономической теории: поведенческая экономическая теория; теория перспектив; экономика благосостояния (социально-экономический аспект обеспеченности продовольствием).

6. Новые теории международной торговли и экономическая география: новая теория международной торговли; новая экономическая география.

7. Новые технологии прикладного анализа: клиометрия (новая экономическая история); система национальных счетов; равновесие Нэша и теория игр; методы анализа экономических временных рядов; распределение Ховельмо; модель жизненного цикла получения доходов, обучения и потребления; анализ дискретного выбора; экспериментальная экономика; создание основ теории оптимальных механизмов; анализ рынков с поисковыми издержками.

Экономическая теория как общественная наука тесно связана с трансформациями экономических систем и не может не адаптироваться к устойчивым и объективно протекающим изменениям как в целом в хозяйственной жизни общества, так и в отдельных отраслях экономики. Современная экономическая теория – это совокупность сосуществующих, дополняющих, а в отдельных случаях конкурирующих теорий [1], суть которых состоит в следующем.

1. Современная экономическая теория – это наличие различных экономических школ, каждая из которых базируется на своих методологических принципах и подходах. В этих условиях имеют место получившие широкое распространение разные позиции о месте и роли экономической теории, ее особенностях как науки в современном обществе [3].

2. Теряя внутреннее единство, экономическая теория находится в глубоком кризисе, распадаясь, «раскалываясь» на отдельные автономные части, никак не связанные и вступающие в противоречие друг с другом.

3. Экономическая теория трансформируется в направлении расширения спектра областей знаний, все больше внедряясь в такие науки, которые, с традиционной точки зрения, не являются экономическими: социологию, эконометрику, антропологию, психологию, политологию и др.

4. Экономическая теория как наука и учебная дисциплина все больше приобретает практикоориентированную направленность, пытаясь формулировать конкретные «рецепты» тем или иным субъектам хозяйствования, нацеленные на более успешное достижение их экономических (а в отдельных случаях не только экономических) целей.

5. Экономическая теория должна использовать широкий математический инструментарий, включая математические модели, с помощью которых в полной мере можно раскрыть всю сущность экономических явлений и процессов на основе численных значений тех или иных показателей и связей между ними.

На наш взгляд, категоричность взглядов на новое содержание экономической теории вряд ли оправданна. Экономическая теория как общественная наука имеет свою методологию, принципы, концепции, школы. Она не должна «догонять или перегонять» появление новых экономических явлений, процессов, закономерностей и тенденций развития экономических систем в условиях трансформации мировой и национальной экономик на рубеже XX и XXI вв.

Во-первых, сохраняя свою сущностную природу, меняются лишь конкретные формы проявления действия экономических законов развития общества в результате появления новых или качественной трансформации уже существующих характеристик.

Во-вторых, многообразие теоретических школ в экономической науке, их сосуществование только подтверждает мысль о том, что экономическая наука находится в постоянном движении. Она развивается, ее содержательная сторона качественно усложняется; сосуществование разных экономических школ позволяет более многогранно, многоаспектно рассматривать экономическую сторону жизни общества, ее природу на разных уровнях экономики: индивид, предприятие, отрасль, регион, страна, мировое сообщество.

В-третьих, создавая иллюзию противоречивости и ошибочности, те или иные экономические школы и теории в своем единстве в полной мере и с разных сторон комплексно дают ответы на многие вопросы деятельности хозяйствующих субъектов и связей между ними: одни с сущностных, другие с явленческих позиций. При этом каждая экономическая школа и теория рассматривают экономические явления и процессы «под своим углом», с позиции конкретных экономических интересов или субъектов хозяйствования.

В-четвертых, постоянно проводя экспансию в другие области теории и практики, экономическая теория адаптируется к действию новых закономерностей общественного развития в условиях глобализации и интеграции экономического пространства. При этом усиливаются межрегиональные, межотраслевые, междисциплинарные связи. Не учитывать последнее обстоятельство значит далеко не всегда иметь возможность многогранно, комплексно и всесторонне исследовать и формулировать содержание экономических явлений и процессов.

В-пятых, заметно прагматизируясь, уходя в практическую нишу экономики, экономическая наука все больше подвержена активизации деятельности в явленческих областях, и это приводит к тому, что она «сдает» свои теоретические позиции, все больше исследуя практические стороны деятельности хозяйствующих субъектов. В этой связи главное предназначение экономической науки состоит в том, чтобы исследовать и отражать сущностные стороны функционирования экономических систем и их структурных элементов, формулировать внутреннюю природу экономических явлений и процессов, а не поверхностные их характеристики. А это означает, что любые стороны хозяйствования, в том числе и в сфере недропользования, экономическая наука должна объяснять научным образом, быть независимой, учитывать объективно сложившиеся закономерности общественного развития.

Действительно, создаваемая в период капиталистического производства, экономическая теория обрела прикладную оболочку, стала «работать» на интересы соответствующих производственных отношений, ее концепции применимы, главным образом, в финансовых отношениях. Но общество не стоит на месте, объективные причины качественного изменения экономической теории есть следствие действия факторов общественных изменений, которые логически не помещаются в рамки капиталистической парадигмы.

В-шестых, сложная хозяйственная жизнь общества слишком многообразна, «многоцветна», она имеет не только количественные, но и качественные характеристики, которые нередко очень сложно оценить численным образом. Широкий математический инструментарий в большей степени способен объяснять действия человека как рационального существа с позиции его рационального поведения. Например, институциональная экономическая теория далеко не всегда может использовать возможности экономико-математического моделирования, объяснять деятельность формальных и неформальных общественных институтов только с позиций рационализма, а значит и экономико-математического аппарата. Это отнюдь не означает бесперспективности использования математических методов исследования экономически процессов. Они широко востребованы и будут широко использоваться в экономической теории XXI в. Речь идет лишь о нецелесообразности излишней абсолютизации их значимости, места и роли в экономической теории настоящего и будущего. Математические модели действительно отражают существующую практику деятельности экономических агентов, хотя в ряде случаев не в полной мере. Однако нередко они позволяют на виртуальном уровне понять сущность экономических механизмов и действие их элементов, а значит и переносить их на реальную действительность.

Современные компьютерные технологии создают возможности прогнозирования состояния функционирующей экономической системы в условиях изменений значений одного или нескольких параметров. В данном случае речь идет не о планировании, а о прогнозировании, т. е. вероятностном планировании системы хозяйствования и ее составных частей.

Категоричность в суждениях, бескомпромиссность экономических оценок в условиях действия очень сложной системы экономических интересов в ряде случаев обостряет в обществе социальную напряженность, создает благоприятную почву для конфронтации, препятствует созданию цивилизованного гражданского общества. И в этих вопросах экономическая наука тесно взаимодействует с политикой, с экономической ролью государства на всех уровнях управления экономическими и в целом общественными процессами. С другой стороны, уход от объективной реальности, зависимость от тех или иных общественных институтов создает почву для развития антинауки, лженауки и всего, что с ними связано. В современных публикациях, особенно в отдельных статьях периодических изданий, мы нередко встречаемся с «подобными перегибами» в ту или иную сторону. Соблюдение «золотой середины» – это основное условие развития экономической науки, которое обеспечивается «разумным» образом.

Было бы неверно, с нашей точки зрения, считать кризисным современное состояние экономической теории. Дальнейшее развитие экономической науки, появление новых знаний, которым становится тесно в существующих общепризнанных парадигмах экономической науки, — это естественная историческая закономерность, а не кризис науки.

Эволюция экономической теории как науки прослеживается на всех исторических этапах ее развития. Так, минувшее столетие, с одной стороны, характеризуется бурным развитием марксистской политической экономии, с другой – экономики А.Маршалла.

К середине XX в. формируется макроэкономика Д.Кейнса. Как результат великой депрессии 30-х гг. во второй половине того же столетия начинается становление, а в дальнейшем развитие теории общественного выбора. Далее на фоне во многом господствующей классической политической экономии появляются новые направления экономической теории, например эволюционная экономика, поведенческая экономика, экономика природопользования, экономическая теория поиска работы, экономика человека, проблемы развития международной экономической политики, экономика развития, теория рациональных ожиданий, теория поведения экономических агентов в условиях риска и неопределенности, теория отраслевых рынков, современные теории международной торговли, и др.

Целостность экономического мировоззрения основана на новой парадигме, включающей все предшествующие научные результаты экономической теории прошлых столетий. Главная ее особенность видится в комплексном подходе, ее гармоничном взаимодействии с социологией, психологией, политикой и другими областями знаний, без которых нельзя «покорить глубины» теории общественного выбора, объяснить не только природу, содержание процессов, связанных с функционированием экономических систем, но и предпосылки, условия, факторы их становления, развития, трансформации в какие-либо иные, в том числе прогрессивные формы. В то же время «новая» экономическая теория XXI в. как наука должна изыскивать ответы на вызовы времени – вопросы, возникающие в мировой и национальной экономике на качественно новом уровне развития [12].

Одни экономисты современную экономику называют информационной, другие – сетевой, третьи — сервисной, четвертые – инновационной и т. д. [14]. В частности, на вопрос, является ли экономика России инновационной, в частности в сфере недропользования, более чем вероятно, однозначного положительного ответа дать нельзя. Это объясняется прежде всего тем, что национальная экономика, в том числе экономическая система недропользования, слишком сложна по структуре и тенденциям развития [15]. С этих позиций национальная экономика требует глубокого исследования в отраслевом и региональном разрезе.

Таким образом, при разных критериях оценки в всех случаях речь идет о новой, и при этом одной и той же экономике, которая нуждается в новой экономической науке, не попадающей в плен догм и иллюзий, вписывающей в новую парадигму и научно объясняющей логичность и закономерность сосуществования разных экономических школ, общественных институтов, типов экономических систем в их постоянном развитии.

Экономическая теория XXI в., с научной точки зрения, должна объяснять глубинные условия господства социального прогресса, способы отказа от всемогущества рынка «с диким лицом», в котором лозунг «все для человека, все для блага человека» превращается в свою противоположность – во всемогущие идеи максимизации прибыли экономических агентов любой ценой.

Существует и другой взгляд на роль экономической теории как науки в современных экономических системах. В соответствии с ним экономическая теория способна дать исчерпывающие ответы и «рецепты» по максимизации доходов хозяйствующих субъектов, предотвращению экономических кризисов, росту или снижению цен и т. д. В действительности она объясняет сущностные стороны действия экономических механизмов, т.е. дает ту необходимую информацию, которая используется прикладной экономикой для решения тех или иных социально-экономических задач общества на всех уровнях управления экономикой.

Стоит сделать особенно важное, на наш взгляд, заключение: универсальная экономическая теория отсутствует в силу множественности составляющих и сложности хозяйственной жизни. Поэтому современное экономическое мышление вынуждено адаптироваться к многообразию и противоречивости существующей в реальности многоликой, динамичной и очень сложной экономической системы.

Развитие теории и методологии функционирования экономической системы сферы недропользования связано с необходимостью проведения научных исследований по ряду направлений.

1. Разработка и обоснование теоретических положений в области формирования и развития институтов в сфере недропользования на мега-, макро-, мезо- и микроуровнях функционирования экономической системы.

2. Проведение сравнительного анализа состояния институциональных систем в сфере недропользования России и других стран с последующим выявлением причин страновых различий.

3. Исследование содержания нормативно-правовой базы, регулирующей отношения в сфере недропользования, с учетом особенностей действующего законодательства Европейского Союза.

4. Выявление и научное обоснование приоритетных направлений развития институциональных систем в сфере недропользования, в том числе совершенствование законодательной базы, системы государственного управления, института государственного контроля.

5. Разработка научных подходов по формированию новых институтов: гражданского общества и рыночной экономики во взаимосвязи с разработкой и научным обоснованием предложений по трансформации института собственности на минерально-сырьевые ресурсы недр в соответствии с существующими экономическими реалиями и принципами современного этапа функционирования рыночной экономики с учетом опыта других стран.

6. Разработка нового организационно-экономического механизма недропользования.

7. Научное обоснование целесообразности формирования и развития высокотехнологических кластеров в рамках соответствующих промышленных предприятий сферы недропользования.

8. Развитие методологии в области экономической оценки запасов полезных ископаемых.

9. Разработка новых инвестиционных механизмов инновационного развития предприятий сферы недропользования.

Дальнейшее развитие сферы недропользования в национальной экономике определяет необходимость активизации научных исследований в рамках экономики природоохранной деятельности:

- методологическое обеспечение экологической политики в целях устойчивого развития сферы недропользования;
- совершенствование системы государственного регулирования процессов экологизации сферы недропользования;
- развитие процессов институционализации экологической политики в сфере недропользования;
- методологическое обоснование целесообразности экологической ренты, ее дифференциации и разработка механизма ее образования и использования;
- исследование динамики показателей, связанных с определением места и роли предприятий сферы недропользования в формировании макроэкономических показателей.

Эффективность и устойчивость работы предприятий сферы недропользования в современных условиях весьма проблематичны. Это объясняется рядом факторов, к основным из которых можно отнести макроэкономическую нестабильность внешней среды экономики-территориальной системы недропользования, снижение качества запасов недр, рост инвестиционных рисков при освоении и добыче многих новых месторождений. По мнению многих авторитетных экономистов, специализирующихся в сфере недропользования, для обеспечения эффективности и устойчивости деятельности предприятий, работающих в отраслях минерально-сырьевого комплекса, необходимо вводить дифференцированный подход к управлению ими в зависимости от уровня эффективности освоения ресурсов. Он состоит в том, что чем ниже эффективность освоения и добычи ресурсов, тем выше роль государства в качестве своеобразного амортизатора постоянно растущих экономических проблем в сфере недропользования. Речь идет о государственной поддержке хозяйствующих субъектов посредством различных механизмов и форм [4].

Подводя некоторые итоги, стоит отметить тот факт, что в условиях смешанной экономики основным субъектом регулирования сферы недропользования остается государство, меняются лишь формы, инструменты, механизмы этого регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гурова И.П.* Конкурирующие экономические теории / Ульяновский гос. ун-т. Ульяновск, 1998.
2. *Даниленко Л.Н.* Рентно-сырьевая экономика России и проблемы ее трансформации: Автореф. дис...д-ра экон. наук. СПб, 2014.
3. *Довбенко М.В.* Современные экономические теории в трудах нобелиантов / М.В.Довбенко, Ю.И.Осик. М.: Академия естествознания, 2011.
4. *Дьячкова Е.А.* Экономическое регулирование нефтегазовой отрасли в постсоветской России. М.: Геоинформмарк, 2011.
5. *Кейнс Д.М.* Общая теория занятости, процента и денег. М.: Гелиос АРВ, 2012.
6. *Киммельман С.А.* Будет ли в России справедливая экономика? <http://www.gosbook.ru/node/48637>.
7. *Крюков В.* Институциональные особенности российской экономики. Анализ развития системы недропользования в России (О необходимости ужесточения институциональных условий) elib.org.ua/ruseconomics/ua_readme.php?subaction...id.
8. *Маршалл А.* Принципы политической экономии. М.: Прогресс, 1983.
9. *Риккардо Д.* Начала политической экономии и налогового обложения. М.: ЭКСМО, 2007.
10. *Смит А.* Исследование о природе и причинах богатства народов. М.: ЭКСМО, 2009.
11. *Стиглер Д.* Экономия на масштабах производства. М.: Экономика, 1958.
12. *Сотин В.С.* Эволюционная теория в экономической науке: проблемы и перспективы. // Проблемы современной экономики. 2009. № 3 (31).
13. *Фридман А.А.* Лекции по курсу микроэкономики продвинутого уровня. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2007.
14. *Хайкин М.М.* Управление сферой услуг в развитии человеческого капитала / Санкт-Петербургский ун-т экономики и финансов. СПб, 2010.
15. *Хайкин М.М.* Сервисный капитал информационно-сетевой экономики: вопросы теории, методологии, практики / М.М.Хайкин, А.Б.Круглик. СПб: Астерион, 2013.
16. *Эрроу К.Д.* Общественный выбор и индивидуальные предпочтения. М.: Экономика, 1951.
17. *Hicks J.R.* Mr. Keynes and the 'Classics'. A Suggested Interpretation *Econometrica*, 1937. N 5(2).

REFERENCES

1. Gurova I.P. Konkurriruyushchie ekonomicheskie teorii (*The competitive economic theories*). / Ul'yanovskii gos. un-t. Ul'yanovsk, 1998.
2. Danilenko L.N. Rentno-syr'evaya ekonomika Rossii i problemy ee transformatsii (*The raw rent-material economy of Russia and problems of its transformation*): Avtoref. dis... d-ra. ekon. nauk. St Petersburg, 2014.
3. Dovbenko M.V., Osik Yu.I. Sovremennye ekonomicheskie teorii v trudakh nobeliantov (*The modern economic theories in proceedings of nobelians*). Moscow: Akademiya estestvoznaniya, 2011.
4. D'yachkova E.A. Ekonomicheskoe regulirovanie neftegazovoi otrasli v postsovetskoj Rossii (*The Economic adjusting of oil and gas industry in postsoviet Russia*). Moscow: Geoinformmark, 2011.
5. Keynes D.M. Obshchaya teoriya zanyatosti, protsenta i deneg (*The general theory of employment, percent and money*). Moscow: Gelios ARV, 2012.
6. Kimmel'man S.A. Budet li v Rossii spravedlivaya ekonomika? (*Will the just economy be in Russia?*). <http://www.gosbook.ru/node/48637>.
7. Kriukov V. Institucional'nye osobennosti rossiiskoi ekonomiki. Analiz razvitiya sistemy nedropol'zovaniya v Rossii (O neobkhodimosti uzhestocheniya institucional'nykh uslovii) (*Institutional features of the Russian economy. An analysis of development of the system of subsoil use in Russia (On the necessity of toughening of institutional terms)* www.elib.org.ua/ruseconomics/ua_readme.php?subaction...id.
8. Marshall A. Printsipy politicheskoi ekonomii (*Principles of the political economy*). Moscow: Progress, 1983.
9. Rikkardo D. Nachala politicheskoi ekonomii i nalogovogo oblozheniya (*Basics of political economy and tax levying*). Moscow: Eksmo, 2007.
10. Smit A. Issledovanie o prirode i prichinakh bogatstva narodov (*Research of nature and reasons of the wealth of nations*). Moscow: Eksmo, 2009.
11. Stigler D. Ekonomiya na masshtabakh proizvodstva (*Savings in the scales of production*). Moscow: Economy, 1958.
12. Sopin V.S. Evolyutsionnaya teoriya v ekonomicheskoi nauke: problemy i perspektivy (*The evolutionary theory in economic science: problems and prospects. Problems of modern economy*). 2009. N 3 (31).
13. Fridman A.A. Lektsii po kursu mikroekonomiki prodvinutogo urovnya (*Lectures on microeconomics of the advanced level*). Moscow: Izd. dom Vysshei shkoly ekonomiki, 2007.
14. Khaykin M.M. Upravlenie sferoi uslug v razvitii chelovecheskogo kapitala (*Management of the sphere of services in the development of human capital*). St Petersburg: Sankt-Peterburgskii un-t ekonomiki i finansov, 2010.
15. Khaykin M.M., Krutik A.B. Servisnyi kapital informatsionno-setevoi ekonomiki: voprosy teorii, metodologii, praktiki (*The service capital of informative-network economy: questions of theory, methodology, practice*). St Petersburg: Asterion, 2013.
16. Errou K.D. Obshchestvennyi vybor i individual'nye predpochteniya (*Public choice and individual preferences*). Moscow: Ekonomika, 1951.
17. Hicks J.R. Mr. Keynes and the Classics. A Suggested Interpretation *Econometrica*, 1937, N 5(2).

SUBSOIL USE WITHIN THE CONTEXT OF THE MODERN ECONOMIC THEORY DEVELOPMENT

M.M.KHAIKIN, *Dr. of Economics, Professor, marcmix.spb@gmail.com
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia*

Essence of the economic system of subsoil use is examined: its maintenance, elements; features in the conditions of the mixed economy. The special accent is done on the evolution of economic theory and role of the state as a basic regulator of activity of all managing subjects working in the field of raw mineral-material complex and its infrastructure. An author shows the role of modern economic theory as a science in development and substantiation of principles of functioning of the territorial-economic system of subsoil use, both from general theoretical and practical point of view.

Key words: economic system, economic theory, the field of subsoil use.

Горное образование: традиции и перспективы в XXI веке

Mining education: traditions and perspectives in the XXI century

УДК 378.147

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ТВОРЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ЛИЧНОСТИ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ

В.П.ГРАХОВ, *д-р экон. наук, профессор, pgs@istu.ru*

Ю.Г.КИСЛЯКОВА, *канд. пед. наук, доцент, pgs@istu.ru*

У.Ф.СИМАКОВА, *ведущий инженер кафедры, kafedra.pgs@mail.ru*

Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова, Россия

Рассмотрены проблемы и методы формирования и развития творческого потенциала личности студентов технических вузов на примере кафедры «Промышленное и гражданское строительство» инженерно-строительного факультета Ижевского технического университета им. М.Т.Калашникова. Приведены примеры методов формирования и условий для развития творческого потенциала личности студентов.

Ключевые слова: творческая деятельность, стимулирование творческой активности, развитие креативных способностей, интеллектуальное творчество, творческое мышление, личность студента.

Происходящие процессы модернизации и перехода на новые стандарты высшего профессионального образования формулируют новые требования к уровню подготовки специалистов. Процессы и тенденции, происходящие в системе высшего образования, требуют радикального поворота к личности, пересмотра взаимоотношений преподавателя и студента, превращая второго в субъект обучения, и остро ставят проблему качества образования. В современном обществе человеку часто приходится сталкиваться с такими жизненными ситуациями, в которых значительна степень неопределенности, нет заранее известных способов действий, гарантированно ведущих к успеху. Человек может справляться с такими ситуациями, опираясь на силу своих внутренних возможностей: творческие способности, интеллект, умение взаимодействовать с другими людьми в ситуациях новизны, – иными словами, задействовав свой творческий потенциал [4].

Не является исключением и подготовка студентов будущих строителей. В ней необходимо гармонично сочетать технологическую и эстетическую составляющие профессиональной деятельности. Строители как специалисты-профессионалы должны соответствовать быстро изменяющимся социально-экономическим условиям, развитию и внедрению новейших технологий, быть способными самостоятельно решать сложные профессиональные проблемы управления строительными проектами, создания современных строительных сооружений.

Для студентов, обучающихся на инженерно-строительных специальностях в технических вузах, особое значение приобретают вопросы творческой самоактуализации, раскрытия творческого потенциала. Педагогической задачей их профессионального образования

становится поиск и внедрение инновационных технологий, позволяющих студентам с большей эффективностью создавать творческие проекты, гармонично сочетающие конструктивно-технологическую, экономическую и даже художественно-эстетическую стороны. В связи с этим в процессе профессиональной подготовки актуальным становится овладение способами проектной деятельности, которые инициируют творческую активность, самостоятельность и нестандартность в решении творческих задач. Прослеживается и тенденция к пониманию педагогической технологии как части педагогической системы, целью которой является гарантированное достижение целей, максимальное раскрытие творческого потенциала, обеспечение высокой эффективности, оптимальное распределение человеческих, материальных и финансовых ресурсов.

Общей чертой различных вариантов современных педагогических технологий является изменение роли обучаемого: он становится активным участником образовательного процесса.

Несмотря на многообразие подходов, большинство исследователей (В.П.Беспалько, Г.К.Селевко, В.А.Сластенин и др.) в качестве основных характеристик педагогической технологии называют: системность и целостность; концептуальность; научность, точность, интегративность; управляемость; диагностичность; эффективность; воспроизводимость; качество обучения и гарантированность результатов [5].

В последние годы появился новый аспект проблемы подготовки специалистов с высшим профессиональным образованием для различных сфер промышленности – подготовка управленческого и инженерно-технического персонала к деятельности в нестандартных, зачастую опасных ситуациях, в условиях повышенного риска. В таких ситуациях от управленческого и инженерно-технического персонала требуется готовность принимать решения, выходящие за рамки сформированных в вузе знаний, умений и навыков и требующие креативного, творческого подхода. Этим объясняется потребность в научной и практической разработке проблем развития у студентов способностей к творчеству, ориентированному на будущую профессиональную деятельность.

Каковы же условия развития творчества студентов и какой должна быть соответствующая система обучения? Дело в том, что всякое знание не только открывает новые области для творческой активности, но при определенных условиях является и тормозом. Обобщение опыта педагогов и психологов, озабоченных развитием творческого потенциала своих воспитанников, позволяет привести некоторые рекомендации для работы преподавателей высшей школы непосредственно в условиях вузовского обучения. Другими словами, выскажем основные педагогические требования, предъявляемые к процессу обучения в вузе и с точки зрения творческого процесса развития мышления его выпускников.

1. Одно из первых педагогических требований состоит в том, чтобы ни в коем случае не подавлять интуицию студента. Часто встречаются педагогические ситуации, когда учащийся, высказывающий догадку или предположение, получает порицание от преподавателя за то, что не может логически обосновать их. Проверка интуиции логикой необходима, но это уже следующий этап творческого акта. Если не будет первого, то не будет и второго; негативные оценки опирающегося на интуицию предположения могут привести именно к этому. Учащегося следует поощрить за попытку использовать интуицию и направить на дальнейший логический анализ выдвинутой идеи.

2. Вторая рекомендация состоит в формировании у любого студента уверенности в своих силах, веры в свою способность решить задачу. Тот, кто не верит в себя, уже обречен на неуспех. Разумеется, эта вера должна быть обоснованной, но важно понять, что переоценка своих возможностей учащимся менее опасна, чем недооценка. Исключение из этого правила касается только студентов вузов с патологически завышенной самооценкой, которую преподавателю обычно удается достаточно быстро обнаружить. Другая проблема состоит в том, что завышенная самооценка может негативно сказаться на развитии интеллекта и совершенствовании профессионального мастерства.

3. В процессе обучения желательно в максимальной степени опираться на положительные эмоции (удивление, радость, симпатия, переживание успеха и т.п.). Отрицательные эмоции подавляют проявления творческого мышления.

4. Необходимо всемерно стимулировать стремление учащегося к самостоятельному выбору целей, задач и средств их решения (как в больших, так и в частных вопросах). Человек, не привыкший действовать самостоятельно, брать на себя ответственность за принятые решения, теряет способность к трудовой деятельности.

5. Следует в довольно широких пределах поощрять склонность к рискованному поведению, хотя любой риск таит в себе массу опасностей, в том числе и для физического здоровья. Опыт показывает, что склонность к риску – одна из фундаментальных черт творческой личности.

6. Важнейшая задача – не допускать формирования конформного мышления, бороться с соглашательством и ориентацией на мнение большинства. Преподаватель может позволить себе создать искусственную педагогическую ситуацию, в которой студент, демонстрирующий слишком высокий уровень конформизма, попадает в неловкое положение, бездумно поддержав заведомо абсурдную точку зрения только потому, что за нее высказывалось большинство других участников дискуссии. Однако здесь необходимы чувство меры и такт, чтобы не унижить «конформиста».

7. Развивать воображение и не подавлять склонность к фантазированию, даже если оно иногда граничит с выдаванием выдумки за истину. Особенно это касается начальных этапов обучения.

8. Формировать чувствительность к противоречиям, умение обнаруживать и сознательно формулировать их. В этом могут помочь специальные задачи из психологического практикума, содержащие противоречия в картинках, рассказах и т.п. При этом само противоречие, даже формально-логическое, отнюдь не должно отождествляться с ошибкой, которую надо просто исправить. Основная роль противоречий в мыслительной деятельности состоит в их способности служить источником новых вопросов и гипотез.

9. Чаше использовать в обучении задачи так называемого открытого типа, когда отсутствует одно правильное решение, которое остается только найти или угадать. Сама по себе тренировка в продуцировании возможных решений (гипотез) существенно повышает показатели беглости, гибкости и оригинальности мышления.

10. Шире применять проблемные методы обучения, которые стимулируют установку на самостоятельное или с помощью преподавателя открытие нового знания, усиливает веру учащегося в свою способность к таким открытиям.

11. Весьма полезным для развития творческого мышления является обучение специальным эвристическим приемам решения задач различного типа.

12. Важнейшим условием развития творчества студентов является совместная с преподавателем исследовательская деятельность. Она возможна лишь в ситуации, когда решается задача, ответ на которую не знает ни студент, ни преподаватель. Особое значение приобретают мотивы самореализации, социальные мотивы, мотивы соревнования и др. При актуализации этих мотивов и формировании внутренней мотивации особое значение имеет личностная включенность преподавателя в совместную деятельность со студентом.

13. Наконец, самое главное требование – всячески поощрять стремление учащегося быть самим собой, его умение слушать свое «Я» и действовать в соответствии с его «советами». Для этого на всех этапах обучения преподаватель должен не просто декларировать свое уважение к личности студента, но и реально чувствовать, переживать непреходящую и ни с чем не сравнимую ценность каждой живой личности [2].

Таким образом, основными педагогическими условиями для развития творческого потенциала личности студента в технических вузах, на наш взгляд, являются:

- помощь студенту в осознании наличия у него творческого потенциала с целью его развития;
- мотивация студента на развитие своего творческого потенциала и овладение приемами творческой деятельности;
- применение методов и приемов, стимулирующих продуктивность мышления за счет расширения индивидуального опыта творческой деятельности студентов;
- педагогическое содействие студентам в приобретении творческого опыта;
- использование приема рефлексивной педагогической оценки результата творческих усилий студентов в режиме конструктивного анализа как самоценного продукта личностного роста обучаемого;
- определение уровня «остаточных знаний» специалистов, выпускаемых по направлению «Строительство».

Первая ступень, на наш взгляд, раскрытия творческого потенциала личности будущих инженеров-строителей – это активизация традиционных видов учебной деятельности (проблемные и «бесконспектные» лекции, лекции-пресс-конференции, лекции с элементами дискуссии, семинары-диалоги, семинары на ролевой основе, практикумы по решению задач, защита проектов, индивидуальная работа со студентами (консультации) и т.д.).

Вторая ступень – активизация информационных технологий обучения как на аудиторных занятиях, так и в ходе самостоятельной работы студентов (компьютеры, кинофильмы, новейшие информационные технологии). Одновременно необходимо использовать методы активного обучения.

Третья ступень – контекстный подход для применения навыков и умений в решении профессиональных задач, широкое использование активных (включая дидактические и ролевые игры, деловые игры, занятия-исследования) и информационных технологий обучения, занятия с элементами исследований, участие в реальных деловых играх (инновационные, проблемно-деловые, организационно-деятельностные) [3].

Необходима ориентация студентов на создание нового оригинального продукта как формы объективизации результатов своего интеллектуального творчества; стимулирование творческой активности студента на процесс создания нового и свойств личности, обеспечивающих ее включенность в этот процесс; развитие креативных способностей студента. Для этого подойдут эвристические методы обучения, дискуссионные, тренинговые, методы проблемного обучения, игры, метод проектов, исследовательские методы.

Для успешного процесса обучения и развития творческого мышления студентов на выпускающей кафедре необходимо наличие научно-технической базы:

- учебно-методический комплект;
- технические средства обучения;
- учебно-наглядные пособия;
- дидактические материалы;
- литература.

На кафедре «Промышленное и гражданское строительство» инженерно-строительного факультета ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» созданы все необходимые условия для обучения и максимального раскрытия творческого потенциала будущих специалистов строительной отрасли. Разработаны электронные конспекты лекций, учебно-методические пособия для каждого курса дисциплин, методика проверки «остаточных знаний» студентов, научно-исследовательские методы в обучении, собственные деловые и ролевые игры, в которых студенты осваивают профессиональную деятельность, учатся принимать решения, выходящие за рамки сформированных в вузе знаний, умений и навыков и требующие креативного, творческого подхода. Специализированные классы оснащены современным лабораторным, научным, исследовательским, технологическим оборудованием, а также программным обеспечением. Для нужд образовательного процесса, для реального

участия кафедры «Промышленное и гражданское строительство» в хозяйственно-договорных отношениях используется Научно-исследовательская лаборатория базового предприятия ФГУП «ГУССТ № 8 при Спецстрое России».

С целью продвижения научных разработок на внешний рынок на кафедре «Промышленное и гражданское строительство» организовываются и проводятся выставки молодежных инновационных проектов с приглашением потенциальных инвесторов (представителей строительных предприятий, региональных властей, бизнес-компаний, общественных организаций). На базе университета проводятся всероссийские и международные конференции, семинары, мастер-классы, тренинги и другие научные мероприятия по проблемам приоритетных научных направлений инженерно-строительного факультета, решения изобретательских и рационализаторских задач, создания малых инновационных предприятий, международной научной интеграции с приглашением российских и зарубежных экспертов. Создана система мотивации для привлечения наиболее талантливых студентов в коллективы студенческих научных обществ с организацией олимпиад, конкурсов по специальности. Развиваются новые подходы, способствующие поиску рациональных и практичных решений наиболее актуальных градостроительных проблем региона, проявлению творческих способностей студентов и молодых исследователей в рамках проведения научно-технической конференции молодых ученых инженерно-строительного факультета ИжГТУ имени М.Т.Калашникова «Строительная наука и производство глазами молодых», международной научно-технической конференции «Стройкомплекс-2013» на тему «Проблемы и достижения строительного комплекса». Обеспечивается массовое участие студентов во внешних семинарах, конференциях, форумах, выставках, в том числе всероссийских («Город XXI века»), с целью обмена опытом и взаимодействия молодых инноваторов, установления профессиональных контактов, представления своих проектов, повышения уровня мотивации к научной и инновационной деятельности.

Особое внимание на кафедре уделяется производственной практике как одному из средств раскрытия творческого потенциала личности студента, развития креативного мышления. Именно на производственной практике будущие инженеры-строители осваивают профессиональную деятельность в непростых, зачастую опасных ситуациях, учатся принимать решения, требующие креативного, творческого подхода.

Профессиональное творчество специалистов проявляется в процессе решения нестандартных задач в ситуациях нового вида, возникающих в сфере профессиональной деятельности. В этих ситуациях специалисту необходимо решать профессиональные задачи в условиях, не позволяющих (или ограничивающих) использование имеющегося у него опыта. Поэтому подготовка к профессиональной деятельности в таких ситуациях предполагает прогнозирование и проектирование задач в процессе обучения [1].

Одним из важнейших инновационных направлений развития системы профессиональной подготовки студентов инженерно-строительных факультетов является открытое образование, индивидуально-ориентированное, направленное на создание условий для обучаемого в проектировании и реализации собственных индивидуальных образовательных траекторий. При этом важно научить студента работать самостоятельно и индивидуально. Подготовка специалиста в современных условиях продолжается всю жизнь. Именно поэтому студенту при обучении в вузе необходимо освоить способы и формы работы, которые позволят ему в дальнейшем продолжить образование и самообразование. Именно такие выпускники будут ориентированы и подготовлены к «образованию через всю жизнь» в отличие от «образования на всю жизнь» [6].

Задача педагогического коллектива кафедры «Промышленное и гражданское строительство» – формирование творческих, креативных специалистов, обеспечение непрерывности образования, преемственности, включения студентов в активную образовательную среду, в самостоятельное управление творческим процессом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Атаева А.А.* Особенности формирования конкурентных преимуществ образовательного учреждения / А.А.Атаева, С.А.Мохначев // Фотинские чтения: Сборник материалов ежегодной международной научно-практической конференции, 27-28 марта 2014 г., г.Ижевск (весеннее собрание). Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2014. С.349-352.
2. *Герасимов Е.Н.* Теория дидактических систем и реализующая ее технология обучения / Чайковский ГИФК. Чайковский, 2008. 284 с.
3. *Грахова Е.В.* Применение современных образовательных технологий в учебном процессе // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования: Материалы VI Международной конференции. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2014. С.96-99.
4. Качество образования – объект комплексного мониторинга / Ю.Г.Кислякова, С.А.Мохначев, О.А.Сачкова, У.Ф.Симакова // Фундаментальные исследования. 2014. № 12-3. С.567-571.
5. *Кислякова Ю.Г.* Остаточные и пороговые знания: концептуально-нормативный подход / Ю.Г.Кислякова, О.В.Любимова. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2010. 140 с.
6. *Мохначев С.А.* Социальная ответственность образовательных организаций / С.А.Мохначев, Е.И.Белова // Современное состояние, тенденции и перспективы развития стран СНГ (Серия «Экономическое славяноведение»): В 2 ч. Ч.1 / Под науч. ред. К.В.Павлова, И.З.Юсупова. Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2013. С.205-208.

REFERENCES

1. *Ataeva A.A., Mokhnachev S.A.* Osobennosti formirovaniya konkurentnykh preimushhestv obrazovatel'nogo uchrezhdeniya (*Features of formation of competitive advantages of an educational institution*). Fotinskie chteniya: Sbornik materialov ezhegodnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 27-28 marta 2014 g., g.Izhevsk (vesennее so-branie). Izhevsk: Izd-vo Instituta komp'yuternykh issledovaniy, 2014, p.349-352.
2. *Gerasimov E.N.* Teoriya didakticheskikh sistem i realizujushhaja ee tehnologija obuchenija (*The theory of didactic systems and the educational technology for its implementation*). Chajkovskij GIFK. Chajkovskij, 2008, p.284.
3. *Grakhova E.V.* Primenenie sovremennykh obrazovatel'nykh tehnologij v uchebnom processe (*The use of modern educational technologies in the educational process*). Tehnicheskie universitety: integracija s evropejskimi i mirovymi sistemami obrazovanija: Materialy VI Mezhdunarodnoj konferencii. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2014, p.96-99.
4. *Kislyakova Yu.G., Mokhnachev S.A., Sachkova O.A., Simakova U.F.* Kachestvo obrazovanija – ob'ekt kompleksnogo monitoringa (*Quality of education – the object of complex monitoring*). Fundamental'nye issledovanija. 2014. N 12-3, p.567-571.
5. *Kislyakova Yu.G., Lyubimova O.V.* Ostatocnyye i porogovyje znaniya: konceptual'no-normativnyj podhod (*Residual and threshold knowledge: a normative-conceptual approach*). Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2010, p.140.
6. *Mokhnachev S.A., Belova E.I.* Social'naja otvetstvennost' obrazovatel'nykh organizacij (*Social responsibility of educational institutions*). Sovremennoe sostojanie, tendencii i perspektivy razvitija stran SNG (Serija «Jekonomicheskoe slavjanovedenie»): V 2 ch. Ch.1. Pod nauch. red. K.V.Pavlova, I.Z.Jusupova. Izhevsk: Izd-vo Instituta komp'yuternykh issledovaniy, 2013, p.205-208.

FORMATION AND DEVELOPMENT OF STUDENTS' CREATIVE POTENTIAL AT A TECHNICAL UNIVERSITY

V.P.GRAKHOV, *Dr. of Economics, Professor, pgs@istu.ru*
Yu.G.KISLYAKOVA, *PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, pgs@istu.ru*
U.F.SIMAKOVA, *Chief Engineer, kafedra.pgs@mail.ru*
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The article deals with the problems and methods of formation and development of creative potential of students of technical universities by the example of the Department «Industrial and civil engineering», Faculty of Civil Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University. The article gives the examples of methods of formation and conditions for the development of students' creative potential.

Key words: creative activity, stimulating creativity, development of creative abilities, intellectual creativity, creative thinking, student's personality.

ЕВГРАФ СТЕПАНОВИЧ ФЕДОРОВ – УЧЕНый, ПЕДАГОГ, АДМИНИСТРАТОР

В.Н.ШАЙДУРОВ, канд. ист. наук, доцент, *s-w-n@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

В статье подняты вопросы, связанные с жизнью и научной деятельностью академика Е.С.Федорова (1853-1919). Представлен период его деятельности в Геологическом комитете, сделавшей его одним из ведущих кристаллографов своего времени. Особо рассмотрена деятельность Федорова как преподавателя и администратора – первого избранного директора Горного института им. Екатерины II. Основой для исследования стали документы, обнаруженные в Санкт-Петербургском филиале Архива Российской академии наук, и воспоминания учеников Федорова.

Ключевые слова: Е.С.Федоров, Горный институт, кристаллография, «Записки Горного института».

Евграф Степанович Федоров родился 10 декабря 1853 г. в Оренбурге. Отец его – кадровый военный, происходивший из обер-офицерских детей, уроженец Тамбовской губернии. В 1823 г. после окончания Главного Инженерного училища Степан Федоров поступил на службу кондуктором в Кондукторскую роту того же училища. В 1826-1828 гг. он служил в Динабургской инженерной команде близ современного Даугавпилса (Латвия). В 1830-1833 гг. после окончания двухлетнего отпуска он продолжил службу уже на Кавказе сначала в Тифлисской инженерной команде, а с 1833 г. при Начальнике инженеров Отдельного Кавказского корпуса. С мая 1838 г. по апрель 1840 г. он находился в заграничной командировке «для приобретения нужных по части инженерной сведений» [6.Д. 68.Л. 2 об.]. В 1840 г. ему было присвоено звание капитана [6.Д. 68.Л. 3]. В 1847 г. Федоров в чине подполковника возвратился в Динабургскую крепость в должности командира инженерной команды, которой он командовал до 1852 г. [6.Д. 68.Л. 4 об.]. В 1852-1857 гг. ему было поручено командование Оренбургской инженерной командой. К этому моменту Степан Иванович был уже женат вторым браком на Юлии Герасимовне, урожденной Ботвинко, происходившей из дворян Ковенской губернии. Родившийся в 1855 г. Евграф был четвертым ребенком.

Поражение России в Крымской кампании поставило на повестку дня необходимость немедленной модернизации армии и флота. Преобразования на флоте проводились под руководством младшего брата императора Александра II Великого князя Константина Николаевича, имевшего чин генерал-адмирала. С началом реформ карьера Степана Федорова приобрела иное направление. В январе 1857 г., будучи уже полковником, он был переведен в Корпус инженеров Морской строительной части, позднее он был введен в состав Строительного технического комитета Морского министерства. Уже в 1857 г. по распоряжению Великого князя Константина Николаевича он был командирован в Астрахань «для осмотра производившихся там строительных работ» [6.Д. 68.Л. 8]. В 1860 г. его направили с ревизией «состояния зданий, казенного имущества и делопроизводства по строительной части в Николаеве, Севастополе и Архангельске» [6.Д. 68.Л. 8]. В 1866 г. он совершил свою последнюю инспекционную поездку по линии Морского министерства в Астрахань, Баку и Каспийские маяки [6. Д. 68. Л. 8 об.]. Уже 15 июня 1866 г. семья Федоровых потеряла кормильца.

С 1857 г. Федоровы проживали в Санкт-Петербурге. В силу постоянных разъездов мужа Юлия Герасимовна самостоятельно вела хозяйство и занималась воспитанием детей. От первого брака Степана Ивановича был сын Иван (1842 г. рождения), от второго брака было пятеро детей: Мария (1849 г. рождения), Евгений (1851 г. рождения), Евграф (1853 г. рождения), Александра (1855 г. рождения) и Евгения (1859 г. рождения).

Выдающиеся способности Евграфа обнаружились достаточно рано, к пяти годам он уже не только умел читать и писать, но и владел четырьмя действиями арифметики.

В 1862 г. он поступил в немецкое училище Св. Анны во 2-й гимназический класс. В 1867 г. он перешел в 4-й класс Второй Санкт-Петербургской военной гимназии. Уже тогда наибольшие успехи он делал в математических науках: по арифметике, алгебре, геометрии он имел наивысший балл – 12, а вот в иностранных языках (немецком и французском), географии и истории его успехи были не столь впечатляющими – 9-10 баллов [б. Д. 1. Л.2-3].

В 1869 г., не дожидаясь окончания гимназии, он сдал конкурсный экзамен в Николаевское инженерное училище, которое окончил в 1872 г. Но он недолго оставался на военной службе и на следующий год поступил вольнослушателем в Военно-медицинскую академию. Здесь он сдал экзамен за 1-й курс и решил выйти в отставку из военной службы, чтобы поступить в число студентов Академии, но в этом ему помешал циркуляр министра народного просвещения Д.А.Толстого, установивший прием в Академию при наличии аттестата зрелости.

Федоров оставил Военно-медицинскую академию и немедленно сдал экзамены на 2-й курс химического отделения Технологического института. Здесь он занимался в течение двух лет химией. Но Технологический институт не удовлетворил Федорова, и он оставил его.

В то же время Федоров увлекается политическими учениями. В 1876 г. он совершил свое первое путешествие в Европу. Но уже с 1879 г. он вновь занимается геометрией многогранников. Вскоре он перешел к творческой работе. К 1879 г. он закончил свой первый труд «Начала учения о фигурах». Эта работа привела его в кристаллографию.

В 1880 г., будучи уже семейным человеком, Федоров поступил в Горный институт прямо на 3-й курс. Несмотря на занятия в институте, он разрабатывал положения геометрической кристаллографии на основе своей первой работы. С этого времени он выступает с докладами в Минералогическом обществе, где привлек внимание академика А.В.Гадолина, по предложению которого Общество приняло решение издать работу Федорова в своих «Записках» (1885).

В 1883 г. Федоров окончил Горный институт первым по списку. У него было большое желание продолжить занятия по геологии при музее института. Однако получить место служителя было сложно. Федоров обратился за поддержкой к своим бывшим преподавателям. В конце мая 1883 г. к директору Горного института В.Г.Ерофееву обратились профессора А.П.Карпинский и П.В.Еремеев, которые считали, что практическая работа Федорова с коллекциями минералов и его исследования по кристаллографии принесут в дальнейшем большую пользу. 7 июля 1883 г. из Горного департамента на имя директора Горного института поступило отношение, согласно которому Федорову были разрешены практические занятия по музею Горного института в течение одного года с выплатой ему жалованья по чину коллежского секретаря. С этого времени он занимался научной работой, не ведя практической деятельности в качестве горного инженера. Он стремился заниматься наукой, но это не нашло поддержки на кафедре минералогии и кристаллографии Горного института.

Весной 1884 г. он принял предложение И.В.Мушкетова войти в состав экспедиции для исследования Северного Урала. А в марте 1885 г. он был назначен исполняющим дела консерватора и делопроизводителя Геологического комитета.

Во второй половине 1880-х гг. он публикует свои работы по геологии: «К вопросу об образовании зеленых сланцев» (1887), «Сиенитогнейсы Северного Урала» (1888), «Геологические исследования в Северном Урале в 1884-1886 гг.» (1889-1890).

В 1891 г. Федоров сделал крупный шаг как геолог-петрограф, предложив Присутствию Геологического комитета осуществить постройку «универсального» столика для оптического исследования шлифов минералов и пород. Этим он положил начало новому методу в области микроскопического исследования кристаллического вещества. Этот прорыв сопоставим с началом применения в оптическом исследовании кристаллов поляризованного света.

Под давлением семейных обстоятельств в 1894 г. Федоров оставил свой пост в Геологическом комитете и покинул Петербург. По предложению А.А.Ауэрбаха он взялся за детальное геологическое исследование Богословского горного округа, одновременно он руководил там геологоразведочными работами. Обеспеченное существование и значительные средства для оборудования местного геологического музея позволили Федорову продолжить научную работу. Он усовершенствовал «универсальный» метод и закончил одну из основных своих работ по кристаллографии «Theorie der Krystalstruktur» (1894, 1895).

Уже в июне 1895 г. Федоров был назначен профессором геологии в Московский сельскохозяйственный институт. В том же году он переехал в Москву, но до 1899 г. сохранял за собой геологическое исследование Богословского горного округа, где проводил летнее каникулярное время.

Осенью 1896 г. он получил предложение читать лекции по кристаллографии в Горном институте вместо оставившего службу П.В.Еремеева. Он принял предложение для организации курса на уровне современного развития этой науки, оставаясь профессором Горного института до 1900 г., два раза в неделю приезжая из Москвы.

В 1896 г. Федоров был избран членом-корреспондентом Баварской академии наук. Главные заслуги были увидены в работах «Симметрия конечных фигур» и «Симметрия правильных систем фигур», к которым он безуспешно пытался привлечь внимание своих коллег в России.

В 1898 г. по приглашению П.Грота он посетил во время рождественских каникул Берлин, Гейдельберг, Мюнхен, Вену, где был радушно встречен немецкими коллегами.

В 1901 г. Федоров получил в Московском университете степень доктора минералогии и геологии *honoria causa*. В том же году он был избран адъюнктом Императорской Российской академии наук. Но Федорову не удалось воспользоваться результатом этого избрания, которое требовало от него переезда в Петербург. В это время у него было место в Московском сельскохозяйственном институте (хорошо оборудованный кабинет и вполне обеспеченное положение).

Большие изменения в жизни высших учебных заведений России произошли в 1905 г. Под влиянием высокой политической активности различных слоев общества, включая студенчество и профессорско-преподавательский состав, 27 августа Николай II подписал указ «О введении в действие временных правил об управлении высшими учебными заведениями ведомства Министерства народного просвещения» [5]. Это дало возможность советам университетов, например, выбирать из числа ординарных профессоров ректора и его помощника, а факультетам – деканов и секретарей факультетов из числа своих профессоров. Новые выборы необходимо было провести до начала учебного года.

Горный институт в этот период пользовался теми же правами, что и прочие университеты, а потому ученый совет должен был провести выборы ректора. После консультаций совет обратился с просьбой о занятии должности ректора к профессору Федорову. В обращении к нему говорилось: «Зная Ваши чувства относительно Института и всей корпорации горных инженеров, мы уверены, что Вы не откажетесь отдать часть Ваших сил служению весьма важному, и даже более – общественному делу. Ваш огромный научный авторитет оградит Вас от мелких неприятностей, связанных с административной деятельностью, а искренняя поддержка со стороны лучших представителей профессорской коллегии облегчит Вам правильное вершение студенческих дел. Кандидатура Ваша вышла из самых чистых и честных побуждений, чуждых всякого личного интереса. Мы питаем к вам глубокое уважение не только потому, что чтим в вашем лице именитого ученого, но и потому, что вполне ценим Ваш независимый характер и Ваш благородный образ мыслей» [3, с.144].

Федоров принял предложение совета Горного института. Его пребывание во главе Горного института характеризовалось активизацией учебной и научной деятельности института. Это относилось не только к преподавателям, но и студентам. Он стал уделять

большое внимание совершенствованию преподавательской деятельности, придавая особое значение научному уровню читаемых дисциплин. Студенты должны были во время лекций знакомиться с последними достижениями научной мысли. В годы директорства Федорова предметная система достигла своего максимального развития.

Лекции Федорова, по воспоминаниям современников, «не были похожи на лекции других профессоров. Он обыкновенно не придерживался содержания, изложенного в его курсе (речь идет об опубликованном учебнике Е.С.Федорова по кристаллографии – В.Ш.), а давал различные его варианты» [4, с.85]. Часто во время лекций он выстраивал новые гипотезы. Так, академик П.И. Степанов вспоминал, что студенты «иногда не понимали того, что ... говорил Е.С.Федоров, – все это было для нас ново и непривычно. Но мы сознавали, что присутствуем при работе выдающегося ученого» [4, с.85]. Однажды во время лекции Федоров начал излагать студентам теорию выполнения пространства параллелоидами, писал много формул и спрашивал, понимают ли они суть материала. Затем он стал над чем-то задумываться и делать паузы; наконец, сказал: «Это все не так – если вы записали мою лекцию, зачеркните все... все, по-видимому, не так... нужно это еще раз обдумать..., когда у ученого что-нибудь не удастся – это самое интересное в работе» [4, с.85].

Он всячески популяризовал высшую геометрию. К Федорову в это время шел приток студентов со стороны. Преимущественно это были студенты Петербургского университета или окончившие в нем курс и посвящавшие себя научной деятельности. Среди них, например, окажется В.В.Никитин – будущий ординарный профессор и директор Горного института (1917-1918).

Несомненной заслугой Федорова стало издание научного журнала «Записки Горного Института императрицы Екатерины II», первый номер которого увидел свет 12 ноября 1907 г.

Надо сказать, что разговоры о необходимости издания собственного журнала ходили среди профессоров института давно. Еще в ноябре 1903 г. профессор А.Н.Митинский направил на имя исполняющего обязанности ректора профессора Г.Т.Лебедева рапорт, в котором просил поставить на обсуждение совета института вопрос о печатании в Горном журнале (издается с 1825 г.) протоколов заседаний совета подобно тому, как это публикуется другими высшими техническими учебными заведениями.

Совет института в декабре 1903 г. принял решение о желательности «приступить, если на это окажутся средства, к изданию Известий Горного института, где можно помещать извлечения из протоколов Совета, научные труды профессоров, рецензии о диссертациях и пр.» [1, с.3].

Революционные потрясения 1905 г. приостановили работу над изданием журнала. Вопрос о создании при институте собственного печатного органа вновь был поставлен Федоровым на заседании совета 3 мая 1906 г. На заседании присутствовали В.В.Никитин, И.А.Тиме, Н.С.Курнаков, В.Н.Липин, К.И.Богданович, В.И.Бауман, Д.С.Зернов и Н.П.Асеев.

На заседании Совета 18 октября 1906 г. было принято принципиальное решение об организации журнала. Уже 6 декабря Федоров докладывал совету, что Записки Института обеспечены материалами. На заседании совета 8 января 1907 г. по докладу Федорова было принято Положение о «Записках Горного института». Записки предполагалось выпускать в виде томов объемом около 50 печатных листов и не периодически, а по мере накопления материала [1, с.5]. Тогда же была утверждена первая статья для напечатания в Записках: Е.С.Федоров «Химические отношения горных пород и их графическое строение». В первый том были рекомендованы также статьи профессоров И.П.Долбни, В.В.Никитина, Н.С.Курнакова, И.Ф.Шредера, К.И.Богдановича [1, с.57].

Отпечатанный первый том Федоров представил в совет 12 ноября 1907 г.

Директорство Федорова совпало с активизацией студенческого движения, охватившего в том числе и Горный институт. После подавления Первой русской революции, в 1908 г.

началось наступление на высшую школу по линии Министерства народного просвещения в лице министра А.Н.Шварца. Федоров, выступавший за сохранение академических свобод, фрондировал усиление контроля властей за высшими учебными заведениями в России. В итоге он вынужден был покинуть свой пост. В 1909 г. единогласным решением ученого совета Горного института Федоров был избран директором на второе трехлетие [6.Д.26.Л.1]. Однако министр торговли и промышленности Тимашев отказался его утвердить [2]. В результате в 8 февраля 1910 г. Евграф Степанович обратился к последнему с рапортом, в котором просил об увольнении от службы, ссылаясь на то, что «будучи до сих пор не утвержденным в ... должности и в виду перемен положения, вызванной переданными мне приказаниями Вашего Высокопревосходительства, при утомлении, наступившем после напряженной 40-летней научной работы, [он не находит] в себе достаточно сил, чтобы успешно выполнить эти приказания» [6.Д.26.Л.1]. Одновременно с этим Федоров написал записку в совет Горного института. К сожалению, в архивных фондах сохранился только ее черновик. В ней он не столь завуалировано изложил причину своей отставки:

«Мне совестно еще раз напоминать Совету Института свое отношение к исполнению обязанностей Директора Института, с которым я мирюсь до сих пор, пока питаю надежду, что вношу свою лепту в дело научного преуспевания в Институте. Но ... мне пришлось проводить по стечению обстоятельств в исполнение меры репрессии, влекущие за собой печально не повышение научного уровня, но опасность существования одного из славнейших и древнейших [родников] знаний, каковым является наш Горный Институт...

Прошу уже на пятый год исполнения обязанностей, коими Совет Института почтил меня в свое время [войти в мое положение – зачеркнуто Федоровым] принять во внимание ту перемену в характере этих обязанностей, которая возлагается на Директора в настоящее время, и нравственно оправдать меня в представлении г. Министру рапорта о моем увольнении» [6.Д. 25. А.Л.1-1 об.].

К концу жизни ученые заслуги Федорова были общепризнаны. 9 марта 1910 г. он был избран почетным членом Минералогического общества в Лондоне, 21 июня того же года – иностранным членом Академии наук в Риме, 13 июня 1912 г. – почетным членом Французского минералогического общества, а 17 июня 1914 г. Женевский университет присудил ему степень доктора физических наук *honoris causa*. 15 января 1919 г. состоялось его избрание в число членов Российской академии наук.

Последние годы жизни Федоров посвятил завершению работ по кристаллохимическому анализу и высшей геометрии.

В то же время он отстаивал свою гражданскую позицию. Во время англо-бурской войны он ответил резким отказом на приглашение Лондонского королевского общества приехать в Лондон для прочтения лекций в заседании Общества, мотивируя свой отказ тем, что «не может уважать нации, которая воспользовалась своей силой для лишения независимости маленьких бурских республик». С началом Первой мировой войны он перестал писать свои работы на немецком языке. С этого момента он принялся за изучение английского языка.

21 мая 1919 г. Федоров скончался в Петрограде.

С 1920 г. в Горном институте периодически проводились по инициативе профессора А.К.Болдырева заседания Федоровского института. С 1944 г. проводятся «Федоровские сессии».

В 1944 г. в АН СССР учреждена премия им. Е.С.Федорова. В 1965 г. именем Е.С.Федорова был назван новый минерал из группы слоистых силикатов федорит (*fedorite*) – $\text{KNa}_4\text{Ca}_4(\text{Al,Si})_{16}\text{O}_{36}(\text{OH,F})_4 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$, открытый в тонких прожилках фенитизированных песчаников на мысе Турьем (Кольский п-ов, Россия).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бокій Б.В. 50 лет «Запискам Горного института» (историческая справка) // Записки Ленинградского горного института. 1959. Т.40. С.3-7.
2. Кумок Я. Евграф Федоров. М.: Молодая гвардия, 1971. 320 с.
3. Очерки истории Горного института (1773-1917) / В.Г.Афанасьев, Л.Т.Позина, Ф.Л.Севастьянов, И.В.Волошинова, Т.В.Плюхина. Санкт-Петербургский горный институт (технический университет). СПб, 2010. 185 с.
4. Памяти академика П.И.Степанова. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
5. Полное собрание законов Российской империи. ПСЗ-III. Т.26. № 26692.
6. Санкт-Петербургский филиал Архива Российской академии наук. Ф.831. Оп.2.

REFERENCES

1. Bokij B.V. 50 let «Zapiskam Gornogo instituta» (istoricheskaya spravka) (50 years on the journal «The Proceedings of the Mining Institute» (historical reference). Zapiski Leningradskogo gornogo instituta. 1959. Vol.40, p.3-7.
2. Kumok Ya. Evgraf Fedorov. Moscow: Molodaya gvardiya, 1971, p.320.
3. Kumok Ya. Evgraf Fedorov (*Evgraf Fedorov*). Moscow: Molodaya gvardiya, 1971. p.320.
4. Pamyati akademika P.I.Stepanova (*In memory of Academician P.I.Stepanov*). Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1952. p.256.
5. Polnoe sobranie zakonov Rossiiskoi imperii. PSZ-III (*Complete collection of laws of the Russian Empire. Third Edition*). Vol.26. N 26692.
6. Sankt-Peterburgskii filial Arkhiva Rossiiskoi akademii nauk (*The Archive of the Russian Academy of Sciences. St Petersburg Branch*). Fund 831. Finding aid 2.

EVGRAF STEPANOVICH FEDOROV – SCIENTIST, TEACHER, ADMINISTRATOR

V.N.SHAIDUROV, *PhD in History, Associate Professor, s-w-n@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article deals with the issues related to the life and scientific activities of Academician Evgraf S. Fedorov (1853-1919). It highlights the period of his work at the Geological Committee, which made him one of the leading crystallographers of his time. The article specifically focuses on Fedorov's activities as a teacher and administrator – the first elected Director of the Mining Institute n.a. Catherine II. The study is based on the documents found in the St. Petersburg branch of the Archive of the Russian Academy of Sciences and memoirs of Fedorov's students.

Key words: E.S.Fedorov, Mining Institute, geology, crystallography, «Proceedings of the Mining University» journal.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ СТАТЬИ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В «ЗАПИСКАХ ГОРНОГО ИНСТИТУТА»

«Записки Горного института» издаются в соответствии с планом изданий, утвержденным ректором Горного университета, в сроки, регламентированные агентством «Роспечать».

К статье прилагаются: экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати; рецензия специалиста сторонней организации; анкеты авторов (ФИО, место работы, должность, ученая степень, ученое звание, e-mail, почтовый адрес, контактные телефоны) и договор о предоставлении персональных данных. Авторы высылают статьи (распечатки на бумаге, электронные версии, сопроводительные документы) в РИЦ Горного университета (pmi.spmi@mail.ru).

Рукописи рассматриваются редколлегией журнала.

Рукописи, не принятые к печати, авторам не возвращаются.

За публикацию статей плата с авторов не взимается.

Гонорары за опубликованные статьи не выплачиваются.

Объем статьи не должен превышать 0,5 авторского листа.

Состав статьи: УДК, название статьи и данные анкет авторов на русском и английском языках, реферат на русском и английском языках (по 250 знаков), ключевые слова на русском и английском языках, собственно текст, библиографический список на русском и английском языках.

Авторы представляют набор статьи в текстовом редакторе Word приложения Windows (Windows 2000, Windows 2003) через 1,5-2 интервала (A4, набор 16 × 24,5 см).

Основной текст: шрифт – Times New Roman, 12 кегль, обычный, межстрочный интервал – 1,5; абзацный отступ – 0,8 см. Автоматический перенос слов (запрещается делать переносы вручную); выравнивание – по ширине (только автоматически! в данном случае недопустимо использование пробелов, табуляции и т.д.). Клавиша Enter (перевод строки) используется только в конце абзаца! Инициалы от фамилии, наименования от единиц отбиваются жестким пробелом: Ctrl + Shift + пробел.

Таблицы: Times New Roman, 9 кегль, обычный. Информацию в таблицах давать не единым массивом, а построчно, т.е. не набирать все данные в одной строке!!! Не сокращать слова. Размер таблиц должен соответствовать формату набора – не более 16 × 24 см.

Сноска задается автоматически, шрифт – Times New Roman, 9 кегль, обычный.

Формулы. Для набора формул использовать *только редактор Equation 3* (или конвертировать в Equation 3); Times New Roman, 12 кегль обычный, крупный индекс – 7 кегль, мелкий индекс – 6 кегль, крупный символ – 14 кегль, мелкий символ – 12 кегль. Латинские буквы набирают курсивом, обычным; русские, греческие буквы, цифры и химические символы, критерии подобия – прямым, обычным, это правило распространяется и на набор индексов в символах.

Библиографический список (литература) составляется *в алфавитном порядке* в соответствии с ГОСТ 7.1-84 с изменением № 1 от 28.05.99. На всю приведенную литературу должны быть ссылки в квадратных скобках в тексте статьи.

Иллюстрации представляются готовыми для печати в виде компьютерной графики. Редактор, в котором выполнены иллюстрации, должен быть совместим с редактором Word. Размер иллюстраций должен соответствовать формату набора – не более 16 × 24 см. Все рисунки должны иметь подрисуночные подписи.

ПОРЯДОК РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Организация и порядок рецензирования.

Представленная автором рукопись направляется на рецензию членам редколлегии или экспертам – ученым и специалистам в данной области (доктору, кандидату наук).

Рецензенты уведомляются о том, что направленные им рукописи являются частной собственностью авторов и относятся к сведениям, не подлежащим разглашению.

Рецензентам не разрешается снимать копии с поступивших рукописей, передавать рукописи на рецензирование другим лицам без согласования с главным редактором.

Рецензирование проводится конфиденциально. Рецензия носит закрытый характер и предоставляется автору рукописи по его письменному запросу без подписи и указания фамилии, должности, места работы рецензента. Рецензия может быть представлена по соответствующему запросу экспертных советов в ВАК РФ.

При наличии в рецензии указаний на необходимость исправлений рукопись направляется автору на доработку. В этом случае датой поступления в редакцию считается дата возвращения доработанной рукописи.

Решение о целесообразности публикации после рецензирования принимается главным редактором.

Автору рукописи, не принятой к публикации, редколлегия направляет по его запросу мотивированный отказ.

Не подлежат рецензированию:

- статьи членов Российской академии наук;
- статьи, рекомендованные к публикации научными форумами и конференциями.

Рецензентом не может быть автор или соавтор рецензируемой работы.

Не допускаются к публикации рукописи, оформленные с нарушением принятых правил издания.

Оригиналы рецензий хранятся в редколлегии в течение трех лет.

Сроки рецензирования в каждом отдельном случае определяются главным редактором с учетом создания условий для максимально оперативной публикации статей (но не более месяца со дня поступления рукописи).

2. Требования к содержанию рецензии.

Рецензия должна содержать квалифицированный анализ материала рукописи, объективную аргументированную оценку.

В заключительной части рецензии должны содержаться обоснованные выводы о рукописи в целом и четкая рекомендация о целесообразности ее публикации в сборнике.

Рецензент может дать дополнительные рекомендации автору и редакции по улучшению рукописи. Замечания и пожелания рецензента должны быть объективными и принципиальными, направленными на повышение научного и методического уровней рукописи.

В случае отрицательной оценки рукописи рецензент должен обосновывать свои выводы.

3. Взаимодействие авторов и рецензентов.

По письменному запросу автора рецензии высылаются без указания фамилий рецензентов. Если автор желает возразить рецензенту, он может прислать в редколлегию письмо, которое должно быть передано рецензенту в течение двух недель. Рецензент может по своему усмотрению ответить автору лично, передать ответ через редколлегию или не отвечать.

Рукопись, не принятая к печати, авторам не возвращается.

3324 **Записки Горного института** / Национальный минерально-сырьевой университет
«Горный». СПб, 2015. Т.213. 121 с.
ISBN 978-5-94211-714-6

УДК 378.6[55+33+54+62+66+50]
ББК 74.58я5

«Записки Горного института» по решению Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 19 февраля 2010 года № 6/6 включены в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Научное издание

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Том 213

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Редакторы: *Е.С.Дрибинская, Л.А.Левина, И.В.Неверова, Н.И.Сочивко*
Компьютерная верстка: *Н.Н.Седых, Л.П.Хлюпина, В.И.Каширина*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

Заключение экспертизы постоянно действующей технической комиссии
от 23.06.2015. Протокол № 3

Подписано к печати 26.06.2015. Формат 60 × 84/8. Усл.печ.л. 14. Усл.кр.-отт. 14. Уч.-изд.л. 12,5.
Тираж 300 экз. Заказ 601. С 176.

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
РИЦ Национального минерально-сырьевого университета «Горный»
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2
lebedev@spmi.ru

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»**

25 июня 2015 года

ОБЪЯВЛЯЕТ КОНКУРС

на замещение должностей научных работников

1. Главного научного сотрудника (4 ставки)

Квалификационные требования:

Ученая степень доктора наук. Наличие крупных научных трудов или дипломов на открытия и авторских свидетельств на изобретения, а также реализованных на практике результатов. Научный авторитет в соответствующей области знаний.

2. Ведущего научного сотрудника (1 ставка)

Квалификационные требования:

Ученая степень доктора или кандидата наук. Наличие научных трудов или авторских свидетельств на изобретения, а также реализованных на практике крупных проектов и разработок.

Информация о конкурсе размещена в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «ГОРНЫЙ» www.spmi.ru

Прием документов для участия в конкурсе осуществляется в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «ГОРНЫЙ» по адресу: г. Санкт-Петербург 21-я линия, д.2, Научно-исследовательская часть, ауд. 1141, (812) 328-86-76.

Окончательная дата приема документов для участия в конкурсе **21 августа 2015 года.**

Проведение конкурса состоится **31 августа 2015 года** в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «ГОРНЫЙ» по адресу: г. Санкт-Петербург 21-я линия, д.2, Научно-исследовательская часть, ауд. 1141, (812) 328-86-76.

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ: Министерства энергетики РФ, Министерства образования и науки РФ, Российской академии наук, Академии горных наук, НП «Горнопромышленники России», Национального минерально-сырьевого университета «Горный»

Международный организационный комитет Конгресса по обогащению угля приглашает горнопромышленников, специалистов угольной отрасли, научных сотрудников, преподавателей вузов, молодых ученых и аспирантов принять участие в конгрессе



XVIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС ПО ОБОГАЩЕНИЮ УГЛЯ

28 июня – 01 июля 2016 года

Санкт-Петербург, Россия

Основные тематические направления Конгресса:

- Сырьевая база угольной промышленности и ее особенности
- Дробление, измельчение, грохочение и классификация
- Гравитационные методы обогащения
- Сухая сепарация
- Флотация
- Обезвоживание, сушка и брикетирование угля
- Технологии глубокой переработки угля
- Обогащение и переработка углеродистых руд
- Исследование, переработка и обогащение угольных шламов, отходов обогащения, добычи и сжигания углей
- Контроль качества, автоматизация и информационные технологии в углеобогащении
- Проектирование углеобогатительных и брикетных фабрик
- Защита окружающей среды



Важные даты:

- Срок представления тезисов докладов – **до 10 мая 2015 года**
- Рецензирование тезисов – **до 28 июня 2015 года**
- Срок представления полного текста доклада – **15 ноября 2015 года**
- Срок оплаты регистрационного взноса для включения доклада в программу и опубликования в трудах Конгресса (при положительном рецензировании) – **не позднее 01 марта 2016 года**

Требования к тезисам докладов:

Тезисы докладов должны представляться на электронный адрес icpc-2016@icpc-2016.com на английском языке и содержать не более 800 слов.

Регистрационный взнос:

- Регистрация до 1 марта 2016 года – **700 USD**
- Регистрация после 1 марта 2016 года – **800 USD**
- Студентам – **100 USD**

(Оплата российскими участниками будет производиться в рублях по курсу ЦБ РФ)



Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, д.2

E-mail: icpc-2016@icpc-2016.com
www.icpc-2016.com



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»**

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
УНИВЕРСИТЕТА**

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА

ГОРНОЕ ДЕЛО

ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО

**ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

ГЕОЭКОНОМИКА И МЕНЕДЖМЕНТ



Компания «Фосагро»



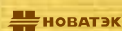
ОАО «Газпром нефть»



Группа компаний BP



ЗАО «Группа компаний
«Титан»



ОАО «НОВАТЭК»



ОАО «Сургутнефтегаз»



ООО «Металл-груп»



ЗАО «Русская медная
компания»

